

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Elias Fernando Trombini**

**VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE AGREGADO MIÚDO DE  
BASALTO EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**

Porto Alegre  
maio 2018

**ELIAS FERNANDO TROMBINI**

**VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE AGREGADO MIÚDO DE  
BASALTO EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de  
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Engenheiro Civil

**Orientadora: Angela Borges Masuero**  
**Coorientadora: Caroline Giordani**

Porto Alegre  
maio de 2018

**ELIAS FERNANDO TROMBINI**

**VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE AGREGADO  
MIÚDO DE BASALTO EM ARGAMASSAS DE  
REVESTIMENTO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora e pela Coordenação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II - Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, maio de 2018

Prof.<sup>a</sup> Angela Borges Masuero  
Dra. pela UFRGS  
Orientadora

Caroline Giordani  
Mestre pela UFRGS  
Coorientadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof.<sup>a</sup> Angela Borges Masuero (UFRGS)**  
Dra. pela UFRGS

**Caroline Giordani (UFRGS)**  
Mestre pela UFRGS

**Prof.<sup>a</sup> Lais Zucchetti (UFRGS)**  
Dra. pela UFRGS

**Prof. Daniel Tregnago Pagnussat (UFRGS)**  
Dr. Pela UFRGS

Dedico este trabalho a toda minha família, em especial a meus pais, Eudes e Sandra, meus irmãos, Elisandra e Esmael, aos amigos e a Morgana, que muito me apoiaram nesta etapa.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Professora Angela Masuero, orientadora desse trabalho, pela ajuda e apoio, não só neste trabalho, mas em quase toda minha graduação, pois desde que fui bolsista de iniciação científica do NORIE, tenho ela por grande exemplo.

Agradeço a Carol, coorientadora deste trabalho, a qual tem uma enorme participação, pois além de sempre estar disponível para sanar minhas dúvidas, auxiliou efetivamente na moldagem e nos ensaios das argamassas em laboratório.

Agradeço ao Airton e ao Ari, que me auxiliaram nos trabalhos em laboratório.

Agradeço a todo pessoal do NORIE e LAMTAC, que sempre estiveram disponíveis para me dar dicas quanto ao modo como poderia executar da melhor forma o trabalho.

Agradeço a empresa responsável pela produção do agregado, em especial a Salete e ao Eduardo, que além de doarem o material para execução dos ensaios, sempre estiveram disponíveis para esclarecimentos.

Agradeço aos meus amigos de Garibaldi, que mesmo estando distante nos últimos anos, sempre foram boas companhias para os finais de semana na Serra.

Agradeço a toda minha família, que me apoiou durante toda a graduação e sempre se preocupou comigo, vindo me visitar quando eu não poderia ir até eles, me fazendo ficar bem e me trazendo comida, o que é bem importante.

Agradeço a todos amigos e colegas feitos durante a fase de graduação, todos tem sua parcela de contribuição nesta caminhada.

Julgue seu sucesso pelas coisas que você teve que  
renunciar para conseguir.

*Dalai Lama*

## RESUMO

TROMBINI, E. F. **Viabilidade da utilização de agregado miúdo de basalto em argamassas de revestimento.** Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

A extração de areia quartzosa de rios está sendo gradativamente impedida por órgãos ambientais, vide o dano ao ecossistema causado por tal ação. Em virtude desse fato, a utilização de agregados alternativos em concretos e argamassas é uma forte tendência, sendo estes de origem variável, de acordo com a disponibilidade da região. Neste trabalho foi avaliada a viabilidade da utilização de agregado basáltico proveniente da região da Serra do RS em argamassas de revestimento, pois além da questão ambiental, esta região encontra-se distante 100 quilômetros dos locais de extração de areia quartzosa, o que eleva muito seu custo. Por se tratar de um agregado produzido com auxílio de britadores, este apresenta grande quantidade de material pulverulento, o que tende a aumentar o consumo de cimento, encarecendo a argamassa e inviabilizando sua utilização. Devido ao viés prático do trabalho, adotou-se o traço de 1:1:6 em volume de materiais secos (cimento, cal hidratada e agregado miúdo, respectivamente), sendo adotados os encontrados no comércio local, cimento CP II F-40 e cal hidratada CH III. Foram estudadas quatro argamassas, sendo a primeira constituída apenas com agregado quartzoso (argamassa REF); a segunda, com o máximo teor de finos (argamassa MTF) compreendido na zona ótima da NBR 7211 (ABNT, 2009a), que gerou a mistura dos agregados com 18% de areia basáltica; a terceira, com maior massa unitária da mistura dos agregados (MMU), que resultou em uma composição com 40% de agregado basáltico; e a quarta, composta unicamente de agregado basáltico (argamassa BAS). As argamassas foram avaliadas por meio de ensaios no estado fresco e endurecido, permitindo o entendimento da influência do agregado em ambos os casos. Verificou-se que, embora o agregado basáltico apresente grande quantidade de material pulverulento, o consumo de água e de cimento teve pequeno aumento (aproximadamente 10 litros por m<sup>3</sup>), o que indica que as alterações de comportamento da argamassa foram causadas, principalmente, pela alteração do agregado. Todos ensaios realizados apresentaram influência do agregado nas características das argamassas, no entanto, nenhuma dessas alterações apresentou resultados que impeçam a utilização do material, como por exemplo, a resistência a compressão, a qual se obteve valores com até 55% de aumento, mas dentro da faixa de utilização. Por fim, fez-se uma comparação de custo de produção das quatro argamassas, e, por conta do menor valor comercial da areia basáltica, as argamassas tiveram seu custo diminuído de acordo com o aumento de proporção deste agregado.

Palavras-chave: Agregado miúdo. Agregado natural. Agregado basáltico. Argamassa de Revestimento. Britagem. Custo do agregado.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho .....	23
Figura 2 – Limites da composição granulométrica para agregados miúdos.....	31
Figura 3 – Padrão de classificação do agregado quanto à esfericidade e arredondamento .....	34
Figura 4 – Detalhamento quanto à classificação do agregado.....	34
Figura 5 – Matriz experimental .....	45
Figura 6 - Distribuição granulométrica da areia quartzosa.....	49
Figura 7 – Imagem (a) e (b) da areia quartzosa obtida em microscópio estereoscópico com aumento de 0,65x.....	49
Figura 8 – Área de armazenamento da areia basáltica na pedreira .....	50
Figura 9 – Quarteamento da areia de basalto .....	51
Figura 10 – Distribuição granulométrica da areia basáltica .....	52
Figura 11 – Areia basáltica vista em microscópio estereoscópico com aumento de 0,65x – sem qualquer beneficiamento.....	53
Figura 12 - Areia basáltica vista em microscópio estereoscópico com aumento de 0,65x – separada por peneiramento na série normal nas figuras (a) até (g). .....	53
Figura 13 – Composição granulométrica do agregado MTF.....	57
Figura 14 – Influência da adição de areia basáltica na massa unitária do agregado miúdo .....	58
Figura 15 – Composição granulométrica do agregado MMU .....	59
Figura 16 - Composição granulométrica dos quatro agregados .....	60
Figura 17 – Determinação da massa unitária dos aglomerantes.....	61
Figura 18 – Ensaio de índice de consistência .....	64
Figura 19 –Ensaio de retenção de água .....	65
Figura 20 - Perfil típico de carga vs deslocamento do squeeze-flow .....	66
Figura 21 – Reômetro rotacional .....	67
Figura 22 – Rotina de ensaio no reômetro rotacional.....	68
Figura 23 – Corpo de prova posicionado para ensaio de tração na flexão .....	69
Figura 24 – Metade do corpo de prova submetido ao ensaio de resistência à tração na flexão, posicionado para o ensaio de compressão axial .....	69
Figura 25 – Leitura do tempo de propagação de onda ultrassônica para determinação do módulo de elasticidade dinâmico.....	70
Figura 26 – Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	71
Figura 27 – Equipamento normatizado para ensaio de retração.....	72
Figura 28 – Representação gráfica da densidade de massa no estado fresco para os diferentes tipos de argamassa .....	75



Figura 29 – Representação gráfica do teor de ar incorporado para os diferentes tipos de argamassa.....	77
Figura 30 – Resultados do ensaio de squeeze flow realizados nas argamassas .....	78
Figura 31 – Comparação de resultados entre as quatro argamassas aos 10 minutos – 3mm/s.....	79
Figura 32 – Resultados do ensaio de reometria rotacional .....	81
Figura 33 – Reometria rotacional média na taxa de cisalhamento inicial .....	82
Figura 34 – Influência do agregado no módulo de elasticidade dinâmico .....	87
Figura 35 – Influência do agregado na densidade de massa aparente no estado endurecido ...	89
Figura 36 – Influência do agregado na resistência à tração na flexão aos 28 dias .....	91
Figura 37 – Influência do agregado na resistência à compressão axial aos 28 dias dos diferentes tipos de argamassa .....	93
Figura 38 – influência do agregado na absorção de água aos 10 e 90 minutos dos diferentes tipos de argamassa .....	95
Figura 39 - Influência do agregado na retração das diferentes argamassas aos 28 dias.....	97
Figura 40 – Microscopia ótica: distribuição do agregado nas argamassas no estado endurecido .....	98
Figura 41 – Compilação dos resultados dos ensaios no estado endurecido .....	101
Figura 42 – Compilação dos resultados dos ensaios no estado fresco .....	102

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Procedimento de mistura dos materiais .....	63
Quadro 2 – Resumo dos ensaios realizados no estado endurecido e o número de corpos de prova moldados por agregado.....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites granulométricos do agregado miúdo para uso em concreto .....	30
Tabela 2 – Tabela dos componentes do cimento Portland composto.....	38
Tabela 3 – Exigências físicas da cal hidratada .....	38
Tabela 4 – Exigências químicas da cal hidratada .....	39
Tabela 5 – Características físicas e químicas do cimento CP II-F 40 utilizado .....	46
Tabela 6 – Características físicas e químicas da cal hidratada CH III utilizada.....	47
Tabela 7 – Caracterização física da areia natural quartzosa.....	48
Tabela 8 – Caracterização física da areia basáltica .....	51
Tabela 9 – Composição do agregado com MTF.....	56
Tabela 10 – Massa unitária das misturas dos agregados .....	58
Tabela 11 – Características físicas do agregado com MMU .....	59
Tabela 12 – Massa unitária dos componentes da argamassa.....	61
Tabela 13 – Traço das argamassas em massa.....	63
Tabela 14 – Massa de material utilizada para mistura das argamassas .....	63
Tabela 15 – Índice de consistência médio das argamassas .....	73
Tabela 16 – Retenção de água das argamassas em estudo .....	74
Tabela 17 – Densidade de massa no estado fresco .....	75
Tabela 18 – Teor de ar incorporado.....	76
Tabela 19 – Tabela comparativa entre densidade de massa e ar incorporado .....	77
Tabela 20 – Valores médios de taxa de cisalhamento e viscosidade aparente para os diferentes tipos de argamassa .....	83
Tabela 21 – Resumo dos resultados obtidos no estado fresco.....	84
Tabela 22 – Módulo de elasticidade dinâmico dos diferentes tipos de argamassa .....	85
Tabela 23 – ANOVA: módulo de elasticidade dinâmico .....	86
Tabela 24 – Densidade de massa aparente no estado endurecido .....	88
Tabela 25 – ANOVA: densidade de massa aparente no estado endurecido.....	88
Tabela 26 – Resistência à tração na flexão.....	90
Tabela 27 – ANOVA: resistência à tração na flexão.....	90
Tabela 28 – Resistência à compressão axial.....	92
Tabela 29 – ANOVA: resistência à compressão axial .....	92
Tabela 30 – Absorção de água por capilaridade.....	94
Tabela 31 – ANOVA: absorção de água por capilaridade aos 10 minutos .....	94
Tabela 32 – Retração e variação de massa aos 28 dias das diferentes argamassas .....	96
Tabela 33 – ANOVA: retração da argamassa aos 28 dias.....	97

Tabela 34 – Resumo dos resultados obtidos no estado endurecido.....	99
Tabela 35 – Custo unitário dos materiais .....	99
Tabela 36 – Consumo por m <sup>3</sup> dos componentes das argamassas .....	100
Tabela 37 – Custo de produção das argamassas por m <sup>3</sup> .....	100

## **LISTA DE EQUAÇÕES**

Equação 1 – Dosagem de material da mistura em massa .....	62
Equação 2 – Determinação do volume de material na mistura .....	62

## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEPAC – Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção

BAS - Basáltica

CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção

CP – Cimento Portland

DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgoto

Km – Quilômetros

Kg – Quilograma

LAMTAC – Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído

mm – Milímetros

MMU – Máxima Massa Unitária

MTF – Maior Teor de Finos

NBR – Norma Brasileira

NORIE – Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação

REF – Referência

RS – Rio Grande Do Sul

## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA.....</b>	<b>21</b>
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	21
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	21
<b>2.2.1 Objetivo principal.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>21</b>
2.3 HIPÓTESE .....	22
2.4 PRESSUPOSTO .....	22
2.6 DELIMITAÇÕES.....	22
2.7 LIMITAÇÕES .....	22
2.8 DELINEAMENTO.....	23
<b>3 AGREGADOS .....</b>	<b>25</b>
3.1 AGREGADOS PARA ARGAMASSA.....	25
3.2 CLASSIFICAÇÃO .....	26
3.4 EXTRAÇÃO .....	27
3.5 CARACTERÍSTICAS.....	28
<b>3.5.1 Granulometria .....</b>	<b>29</b>
3.5.2.1 Arredondamento .....	32
3.5.2.2 Esfericidade .....	33
<b>3.5.2 Agregado britado .....</b>	<b>35</b>
<b>4 ARGAMASSA .....</b>	<b>36</b>
4.1 MATERIAIS CONSTITUINTES DA ARGAMASSA .....	36
<b>4.1.1 Aglomerante .....</b>	<b>36</b>
<b>4.1.2 Cimento .....</b>	<b>37</b>
<b>4.1.3 Cal hidratada .....</b>	<b>38</b>
4.2 PROPRIEDADES .....	39
<b>4.2.1 Propriedades no estado fresco .....</b>	<b>40</b>
4.2.1.1 Trabalhabilidade .....	40
4.2.1.2 Retenção de água .....	40
<b>4.2.2 Propriedades no estado endurecido .....</b>	<b>41</b>
4.2.2.1 Resistência mecânica.....	41
4.2.2.2 Retração .....	41

4.2.2.3 Módulo de elasticidade.....	41
4.3 TIPOS DE ARGAMASSA.....	42
<b>4.3.1 Argamassa de cal .....</b>	<b>42</b>
<b>4.3.2 Argamassa de cimento.....</b>	<b>42</b>
<b>4.3.3 Argamassa mista.....</b>	<b>43</b>
<b>5 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>44</b>
5.1 METODOLOGIA.....	44
5.2 MATERIAIS .....	46
<b>5.2.1 Cimento .....</b>	<b>46</b>
<b>5.2.2 Cal Hidratada .....</b>	<b>47</b>
<b>5.2.3 Agregado Miúdo .....</b>	<b>47</b>
5.2.3.1 Areia natural quartzosa.....	47
5.2.3.2 Areia britada de basalto .....	50
5.2.3.3 Agregado com Maior Teor de Finos (MTF).....	55
5.2.3.4 Agregado com Maior Massa Unitária (MMU).....	57
<b>5.2.4 Água .....</b>	<b>60</b>
5.3 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS .....	60
<b>5.3.1 Quantidade de Material .....</b>	<b>61</b>
<b>5.3.2 Mistura .....</b>	<b>63</b>
5.4 ENSAIOS .....	64
<b>5.4.1 Estado Fresco .....</b>	<b>64</b>
5.4.1.1 Consistência.....	64
5.4.1.2 Retenção de água .....	65
5.4.1.3 Densidade de massa no estado fresco.....	65
5.4.1.4 Ar incorporado.....	65
5.4.1.5 Squeeze-Flow .....	66
5.4.1.6 Reometria Rotacional .....	66
<b>5.4.2 Estado Endurecido .....</b>	<b>68</b>
5.4.2.1 Resistência à tração na flexão.....	68
5.4.2.2 Resistência à compressão axial.....	69
5.4.2.3 Módulo de elasticidade dinâmico .....	70
5.4.2.4 Densidade de massa.....	70
5.4.2.5 Absorção de água por capilaridade.....	71
5.4.2.6 Retração .....	71



<b>5.4.3 Quadro resumo dos ensaios realizados.....</b>	<b>72</b>
<b>6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>73</b>
6.1 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO.....	73
6.1.1 Índice de consistência .....	73
6.1.2 Retenção de água .....	74
6.1.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado .....	75
6.1.5 Squeeze-flow .....	78
6.1.6 Reometria rotacional.....	80
6.2 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO .....	84
6.2.1 Módulo de elasticidade dinâmico .....	85
6.2.2 Densidade de massa aparente no estado endurecido.....	87
6.2.3 Resistência à tração na flexão.....	89
6.2.4 Resistência à compressão axial .....	91
6.2.5 Absorção de água por capilaridade .....	93
6.2.6 Retração.....	95
6.3 ANÁLISE ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO DO AGREGADO BASÁLTICO .....	99
6.4 ANÁLISE CRÍTICA DO MELHOR TEOR DE SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO NATURAL PELO BRITADO DE BASALTO .....	100
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>103</b>
APÊNDICE A – RESULTADOS DOS TRÊS ENSAIOS DE REOMETRIA ROTACIONAL REALIZADOS NAS ARGAMASSAS.....	103
APÊNDICE B – RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO REALIZADOS NAS ARGAMASSAS.....	103



## 1 INTRODUÇÃO

A ANEPAC (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO, 2015) estima que, em 2019, serão consumidos 543 milhões de toneladas de agregados no Brasil. Se comparado a países desenvolvidos, este consumo ainda é considerado baixo, pois existe uma demanda reprimida por conta da inexistência de obras adequadas de infraestrutura e habitação (LUZ; ALMEIDA, 2012). De acordo com dados da CBIC (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO), o déficit habitacional do Brasil no ano de 2017 é de, aproximadamente, 6 milhões de moradias, o que ratifica a tendência de aumento de consumo de agregados.

Embora novos métodos construtivos venham sendo desenvolvidos, o que ainda hoje predomina nas obras de construção civil, incluindo a região da Serra localizada a nordeste do Rio Grande do Sul (RS) é o método convencional, no qual são utilizados aglomerantes (cimento e cal) e agregado miúdo (areia natural quartzosa), para confecção de argamassas de revestimento.

Devido à crescente demanda por agregados utilizados na construção civil, a excessiva extração da areia natural quartzosa de rios tem ocasionado problemas ambientais, chegando a ter sua retirada impedida pelos órgãos competentes, fazendo diminuir a oferta e aumentando muito o valor do produto, principalmente em locais distantes do ponto de extração, como é o caso da Serra do RS. Tal fato é comprovado pela matéria de Argenta (2013), a qual salienta que, durante a proibição da extração no Rio Jacuí, os depósitos de areia e as lojas de materiais de construção da Região Metropolitana de Porto Alegre dobraram o valor do metro cúbico do produto (pois é do Rio Jacuí que provém a maior parte da areia quartzosa que abastece a região metropolitana de Porto Alegre e a Serra do RS).

Em matéria de Almeida (2018), fica evidenciado o dano causado pela extração excessiva de areia do Rio Jacuí, visto que quando a retirada é feita desordenadamente (em profundidades elevadas), existe uma tendência de recomposição natural, fazendo com que o material das bordas do rio se desloquem para o centro dele, ocasionando o solapamento nas margens. Este autor (2018) apresenta dados que comprovam o desaparecimento de 200 metros de uma ilha localizada neste rio nos últimos cinco anos e atribui este fato à excessiva extração de areia.

Ainda que as entidades ligadas à extração de minerais estejam se mobilizando para que seja feito um zoneamento de locais para extração de areia no Lago Guaíba (que banha Porto Alegre), esta situação é discutida há anos e não é definida (JORNAL DO COMERCIO, 2017). Mesmo que este impasse seja resolvido, a Serra do RS se encontra a, aproximadamente, 120 km desta região de extração; sendo assim, o transporte tem grande contribuição na poluição ambiental e para o elevado custo de um insumo que é amplamente utilizado nas construções, impedindo que empreendimentos sejam ofertados aos clientes a valores mais acessíveis, limitando o crescimento da região. Ambrozewicz (2012) afirma que, na prospecção de novas áreas para exploração de agregados, deve-se levar em conta a distância de mercado, já que o transporte é fator determinante na extração de materiais de baixo valor.

A maioria das pedreiras de basalto do Brasil encontram-se no estado do RS e a sua produção é concentrada em uma área relativamente pequena, na região da Serra do RS, na qual existem 12 empresas que fazem a extração de agregado basáltico em escala industrial (MOTOKI *et al.* 2004). A fim de encontrar uma alternativa que seja economicamente viável e ambientalmente menos agressiva, o presente trabalho de conclusão de curso tem por objetivo substituir o agregado miúdo convencional (areia natural quartzosa, extraída de leito de rio) por agregado de basalto (areia britada de basalto, originada da britagem), na confecção de argamassas de revestimento. Campos *et al.* (2007) afirma que a utilização de areia de britagem está se tornando um processo irreversível, seja em locais onde o consumo de agregado é muito alto ou locais em que a distância e as restrições ambientais são maiores, como é o caso das cidades de Bento Gonçalves e Santa Maria, no RS.

A substituição tende a diminuir o custo da produção de argamassa na região e preservar o meio ambiente, visto que causará redução da extração da areia natural quartzosa de rios e eliminará o longo trajeto, realizado por meio de rodovias, da região metropolitana até a Serra do RS; além de aproveitar parte do material inerente gerado no processo de britagem, o qual é produzido como consequência do processamento de agregados maiores, tendo destino incerto.

Assim, sendo possível a substituição do agregado e a preservação das características da argamassa, a Serra do RS passará a ter uma matéria prima para a construção civil bastante abundante na região, podendo se tornar ainda mais próspera, visto que o agregado não necessitará percorrer grandes distâncias, chegando com um preço mais acessível ao mercado consumidor, à construção civil.

Desta forma, o presente trabalho tem por objetivo estudar a viabilidade técnica (por meio de ensaios em laboratório) e econômica da utilização de agregado miúdo britado de rocha basáltica em substituição ao agregado quartzoso para argamassas de revestimento.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes de pesquisas deste trabalho estão descritas a seguir.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa do trabalho é: a substituição de areia natural quartzosa por areia de britagem de basalto, em argamassas de revestimento, é viável?

### **2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Os objetivos de pesquisa descritos a seguir são classificados em objetivo principal e objetivos específicos.

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal do presente trabalho é avaliar a viabilidade técnica, por meio de ensaios em laboratório, e a viabilidade financeira da utilização de areia britada de basalto em substituição à areia natural quartzosa em argamassa de revestimento.

#### **2.2.2 Objetivos específicos**

O trabalho tem como objetivos específicos a identificação do teor ótimo de substituição de diferentes teores de areia natural quartzosa por areia natural basáltica nas argamassas de revestimento, do ponto de vista:

- a) das propriedades no estado fresco;
- b) das propriedades no estado endurecido;
- c) da viabilidade econômica.

## 2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é de que uma parcela da areia natural quartzosa utilizada na composição do traço de argamassa de revestimento possa ser substituída por areia natural proveniente de rocha basáltica sem alterar as características da argamassa. Entende-se também que o custo de produção de argamassa com agregado miúdo proveniente de basalto na Serra do RS seja menor, visto se tratar de um material produzido nesta região.

## 2.4 PRESSUPOSTO

O presente trabalho teve por pressuposto que, por meio dos ensaios realizados em laboratório, é possível avaliar a viabilidade da substituição, identificando a melhor mistura que pode compor o agregado miúdo da argamassa de revestimento.

## 2.6 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a estudar a viabilidade da substituição do agregado miúdo quartzoso pela areia britada de basalto da região da Serra do RS em argamassa de revestimento.

## 2.7 LIMITAÇÕES

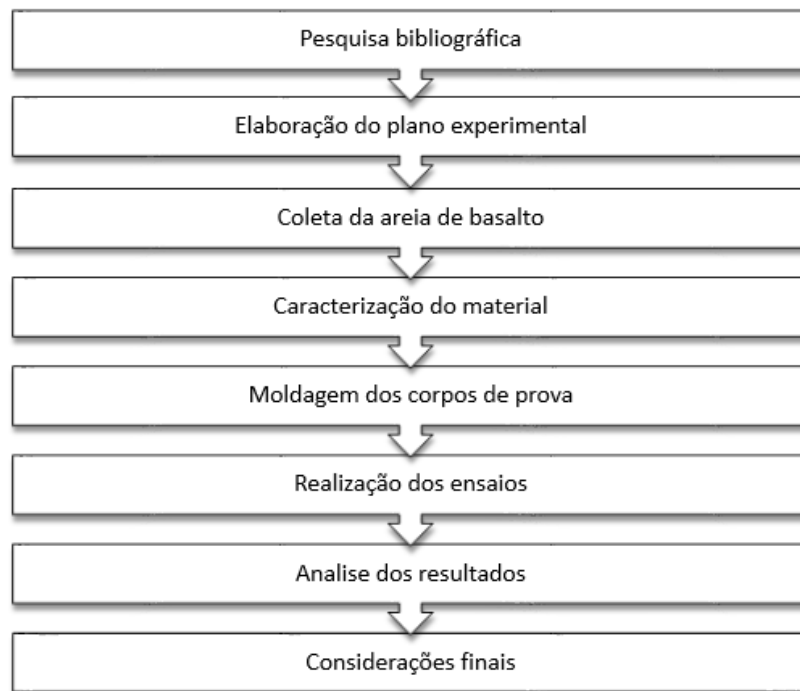
São definidas como limitações do trabalho:

- a) ensaios com areia britada de basalto proveniente de apenas uma pedreira e sem nenhum tipo de beneficiamento;
- b) utilização de um único traço de argamassa;
- c) uso de quatro diferentes porcentagens de substituição do agregado.

## 2.8 DELINEAMENTO

As etapas nas quais o trabalho foi desenvolvido estão representadas na Figura 1 descritas a seguir:

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho



(fonte: próprio autor)

O trabalho teve início por meio de **pesquisas bibliográficas** que tratam de temas relacionados à utilização de areia britada de basalto na composição de argamassa de revestimento, tais como: agregados, dosagens e argamassas. Essas pesquisas tiveram por objetivo ampliar o conhecimento teórico, facilitando o entendimento do assunto, a definição dos ensaios a serem realizados e a posterior análise dos resultados.

Concomitantemente ao estudo de temas relacionados ao assunto desse trabalho faz-se a elaboração do **plano experimental** o qual definiu o rumo e o planejamento da pesquisa, impondo delimitações ao trabalho e descrevendo quais serão os ensaios realizados.

Definidos os ensaios que seriam realizados, fez-se a **coleta da areia britada de basalto** diretamente no local de armazenamento, na pedreira produtora do material. O volume coletado foi o suficiente para realização de todos ensaios determinados no plano experimental, a fim de



eliminar qualquer variabilidade do material. A partir desse momento, deu-se início aos trabalhos em laboratório, partindo da **caracterização do material**, que nos mostrou a diferença do agregado coletado com relação ao agregado miúdo quartzoso, passando pela **moldagem dos corpos de prova** para realização dos ensaios definidos no plano experimental, e a posterior **realização de ensaios**, no estado fresco e endurecido.

Concluídos os testes, a etapa seguinte consistiu na **análise dos resultados**, expondo de maneira informativa e comparativa os resultados obtidos nos ensaios realizados com cada uma das diferentes porcentagens de substituição do agregado miúdo. Finalmente, de modo a encerrar o trabalho, nas **considerações finais** define-se se existe ou não a possibilidade de utilização da areia industrial de basalto em argamassa, de forma a manter as características daquela composta apenas por areia convencional, tecnicamente e financeiramente.

### 3 AGREGADOS

Aproximadamente  $\frac{3}{4}$  do volume do concreto são ocupados por agregados (NEVILLE; BROOKS, 2013). Mehta e Monteiro (1994, p. 08) entendem que, para concreto, “O agregado é o material granular, tal como a areia, o pedregulho, a pedra britada ou escória de alto forno, usado com um meio cimentante, para formar um concreto ou uma argamassa de cimento hidráulico.”, e estes mesmo autores salientam ainda que os agregados têm papel fundamental na determinação do custo e da trabalhabilidade das misturas de concreto, portanto, é impróprio que sejam tratados com menos respeito que o cimento. Para Luz e Almeida (2012, p. 105), “[...] define-se agregado como o material natural de propriedades adequadas, ou obtido por fragmentação de rocha com granulometria menor que 100 mm e superior a 0,075 mm.”. Pode-se encontrar uma definição semelhante à descrita pelos autores na NBR 9.935 (ABNT, 2011, p. 02) que define agregado como sendo “Material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para preparação de argamassa ou concreto. ”.

#### 3.1 AGREGADOS PARA ARGAMASSA

Devido a sua grande utilização na mistura (aproximadamente 75%), a qualidade do agregado tem grande importância para o produto final, pois além de influenciar no custo, esse material tem grande impacto nas propriedades de argamassas e concretos, seja no estado plástico, como a trabalhabilidade, ou no estado endurecido, como a resistência (AMBROZEWICZ, 2012). Para confecção de argamassa utiliza-se algum agente ligante, como cimento ou cal, e areia ou outro agregado de granulometria fina, variando de 0,075 mm até 4,75 mm (LUZ; ALMEIDA, 2012). O agregado miúdo mais comumente utilizado em traços de argamassa é a areia quartzosa extraída de rio. Esta areia tem forma arredondada e dimensão variando de acordo com o local de extração (AMBROZEWICZ, 2012). A areia é definida pela NBR 9.935 (ABNT, 2011) como sendo “[...] agregado miúdo originado através de processos naturais ou artificiais de desintegração de rochas, ou proveniente de processos industriais [...]”.

Com objetivo de minimizar o impacto ambiental gerado pela extração da areia quartzosa de rio ou suprir sua inexistência, vêm-se desenvolvendo estudos sobre agregados miúdos capazes de substituí-la. Um possível substituto para este material é a areia natural britada que, além de

diminuir os danos ambientais, tem menor custo em relação a areia natural quartzosa extraída de rios (HOLSBACH, 2004).

### 3.2 CLASSIFICAÇÃO

A classificação dos agregados pode ser entendida de várias maneiras, sendo que, dependendo do autor, pode-se encontrar uma proposta de classificação de agregados diferente (LUZ; ALMEIDA, 2012). Os agregados podem ser classificados de acordo com suas dimensões, em agregado miúdo, quando com dimensões de 0,075 mm a 4,75 mm, e em agregado graúdo, quando com dimensões entre 4,75 mm e 50 mm (MEHTA; MONTEIRO, 1994). A NBR 7.211 (ABNT, 2009a), além de classificar o agregado em miúdo ou graúdo, também delimita zonas de utilização do agregado de acordo com sua distribuição granulométrica, para concretos.

Dentre as diversas classificações dos agregados, as mais relevantes para este trabalho e para a utilização em argamassas estão citadas por meio de definições da NBR 9.935 (ABNT, 2011), e são apresentadas a seguir:

a) quanto à origem:

- a) naturais (é possível utilizar da forma como encontrado na natureza, porém, podem ou não requerer processos de lavagem, classificação ou britagem);
- b) artificiais (agregados resultantes de processos industriais que envolvem alteração mineralógica, química ou físico-química da matéria prima original);
- c) reciclados (obtidos do processo de reciclagem de rejeitos ou subprodutos da produção industrial, mineração ou construção).

b) quanto à dimensão:

- a) agregado miúdo (agregado cujo material passa pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e fica retido na peneira com abertura de malha de 150  $\mu$ m);
- b) agregado graúdo (agregado cujo material passa na peneira com abertura de malha de 75 mm e fica retido na peneira com abertura de malha de 4,75 mm);
- c) finos (material granular que passa pela peneira com abertura de malha de 150  $\mu$ m).

### 3.3 ORIGEM

Os agregados naturais utilizados na construção civil, seja para argamassa ou concreto, originam-se de rochas consolidadas e sedimentos, como areias (LUZ; ALMEIDA, 2012). Estes mesmos autores definem por rocha o conjunto de minerais resultantes do processo geológico, sendo que essas rochas podem ser formadas por um ou mais minerais, dispostos de acordo com a temperatura e pressão durante sua formação.

Mehta e Monteiro (1994, p. 241) afirmam que, de acordo com sua composição mineralógica, as rochas podem ser classificadas como Ígneas, Sedimentares e Metamórficas, e ainda podem ser subdivididas de acordo com sua composição química, mineralógica e granulométrica. Os autores salientam que:

Pedregulho, areia, silte e argila [...] embora a distinção entre estes quatro integrantes seja feita com base na dimensão da partícula, uma tendência na composição mineral é geralmente percebida. Pedregulhos e areias grossas usualmente consistem de fragmentos de rocha; areias finas e siltes consistem predominantemente de grãos minerais, e as argilas consistem exclusivamente de grãos minerais.

As rochas mais utilizadas como agregado graúdo no Brasil são granito e basalto, e este último, principalmente na região sul e sudeste do país, onde se encontra em grande abundância (AMBROZEWICZ, 2012). O agregado miúdo, que é o foco deste estudo, é proveniente da britagem de uma rocha Ígnea Intrusiva, o Basalto, da formação geomorfológica do Planalto Basáltico, localizado também na região da Serra do RS (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, 2018).

### 3.4 EXTRAÇÃO

A extração contínua das areias naturais, utilizadas em argamassas e concretos, ocasionou o esgotamento das jazidas próximas aos grandes centros urbanos e a criação de restrições ambientais, principalmente quando em leitos de rios. Para Luz e Almeida (2012), estes fatos impulsionam a transformação de rochas em areia de brita ou areia natural britada, por meio de britadores de impacto vertical.

A britagem da rocha pode se dar por meio de britador de mandíbula, britador de rolo, entre outros; no entanto, devido às partículas angulosas e superfícies frescas da areia natural britada, é bastante comum a utilização de britador de impacto de eixo vertical (VSI), com o qual ocorre um arredondamento acentuado do produto, visto que a redução de tamanho é feita pelo impacto de partícula contra partícula ou contra placa de aço (CAMPOS *et al.*, 2007).

A areia natural britada é um produto derivado da rocha, a qual passa por processo de britagem até atingir a dimensão desejada. Para alcançar a granulometria de agregado miúdo, faz-se necessária uma série de manipulações do material de origem, tais como perfuração da rocha, para posterior explosão; transporte do material até os britadores; britagem primária e secundária, a fim de diminuir sua granulometria; e peneiramento do material que sai do britador, permitindo a classificação do agregado (ALVES, 1987).

De modo geral, o agregado miúdo proveniente de britagem tem sua produção em locais próximos a centrais de concreto ou canteiros de obras. Pelo fato desse material ser produzido com menor custo que o agregado extraído de rio, sua demanda é crescente e faz com que os fabricantes de equipamentos de britagem invistam em tecnologia para obter materiais mais regulares, com boa distribuição granulométrica e baixo teor de material pulverulento (SANTOS, 2009).

### 3.5 CARACTERÍSTICAS

Para Ambrozewicz (2012), as características mais importantes dos agregados são “Porosidade, composição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial das partículas, resistência à compressão e substâncias nocivas.”. Mehta e Monteiro (1994) ressaltam as características já citadas acima e dizem ainda: “Estas características derivam da composição mineralógica da rocha matriz [...] e dos tipos de operações e equipamentos usados para a produção do agregado.”.

As características dos agregados afetam duas propriedades diferentes da sua mistura com material ligante: a proporção de dosagem e o comportamento no estado endurecido (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Ambrozewicz (2012) define que, se tratando de agregado miúdo, são características de suma importância para a dosagem:

- a) granulometria: a composição granulométrica tem grande influência na qualidade das argamassas, atuando sobre a compactação e resistência;
- b) módulo de finura: característica relacionada à área superficial do agregado, que influencia no volume de água de molhagem para certa consistência;
- c) massa unitária: leva em consideração os vazios existentes entre os grãos dos agregados, sendo por meio dela que são feitas as transformações dos traços em massa para volume e vice-versa;
- d) inchamento: trata do aumento do volume devido à absorção de água e é bastante relevante quando se relaciona a areias quartzosas em traços com dosagem feita em volume;
- e) apreciação petrográfica: indispensável para se conhecer a natureza do agregado e se este é adequado para as condições de uso que será exposto.

### 3.5.1 Granulometria

A composição granulométrica da areia é um fator determinante nas propriedades das argamassas (TRISTÃO, 1995). Cincotto (1989) corrobora com Frazão (1995), afirmando que os aglomerantes influenciam nas propriedades da argamassa, porém, o principal contribuinte é a distribuição granulométrica do agregado e a adequada proporção entre os constituintes. Embora exista variação de granulometria entre diferentes lotes, a areia extraída de rio possui formato arredondado (devido ao atrito na sua formação), o que a atribui maior compactação (PINTO, 1996).

A granulometria é determinada por meio de ensaio de peneiramento descrito na NBR NM 248 (ABNT, 2009). Mehta e Monteiro (1994, p. 260) ressaltam: “Há várias razões para a especificação de limites granulométricos e da dimensão máxima dos agregados, a mais importante é a sua influência na trabalhabilidade e no custo.” Estes mesmos autores afirmam que areias muito grossas geram misturas ásperas e não trabalháveis, areias muito finas aumentam o consumo de água (por consequência, elevam o consumo de cimento para uma mesma relação água/cimento) e, portanto, agregados que não tem grande deficiência ou excesso de qualquer tamanho de partícula produzem misturas mais trabalháveis e econômicas.

Para Tristão (1995), a distribuição granulométrica da areia é o fator mais importante no comportamento das argamassas. Segundo este autor, a disposição dos grãos do agregado

influencia diretamente no consumo de aglomerante; uma distribuição continua gera menor necessidade de pasta, pois esta apresenta um menor índice de vazios, já que há grãos de todos os tamanhos para preencher os espaços entres eles. Quiroga e Fowler (2004) corroboram com Tristão afirmando que uma distribuição granulométrica descontínua ou uniforme necessita de maior quantidade de pasta para cobrir os grãos, já que é elevado o índice de vazios entres eles, aumentando assim o custo da argamassa para uma mesma trabalhabilidade.

A NBR 7211 (ABNT, 2009a) define as limitações quanto à classificação granulométrica dos agregados para uso em concreto, podendo ser as limitações do agregado miúdo adotadas também para argamassa. Estas limitações estão apresentadas na Tabela 1 e na Figura 2.

Tabela 1 – Limites granulométricos do agregado miúdo para uso em concreto

Peneira com abertura de malha (mm)	Porcentagem retida acumulada, em massa			
	Limites Inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona utilizável	Zona ótima
9,5	0	0	0	0
6,3	0	0	0	7
4,75	0	0	5	10
2,36	0	10	20	25
1,18	5	20	30	50
0,6	15	35	55	70
0,3	50	65	85	95
0,15	85	90	95	100
0	100	100	100	100

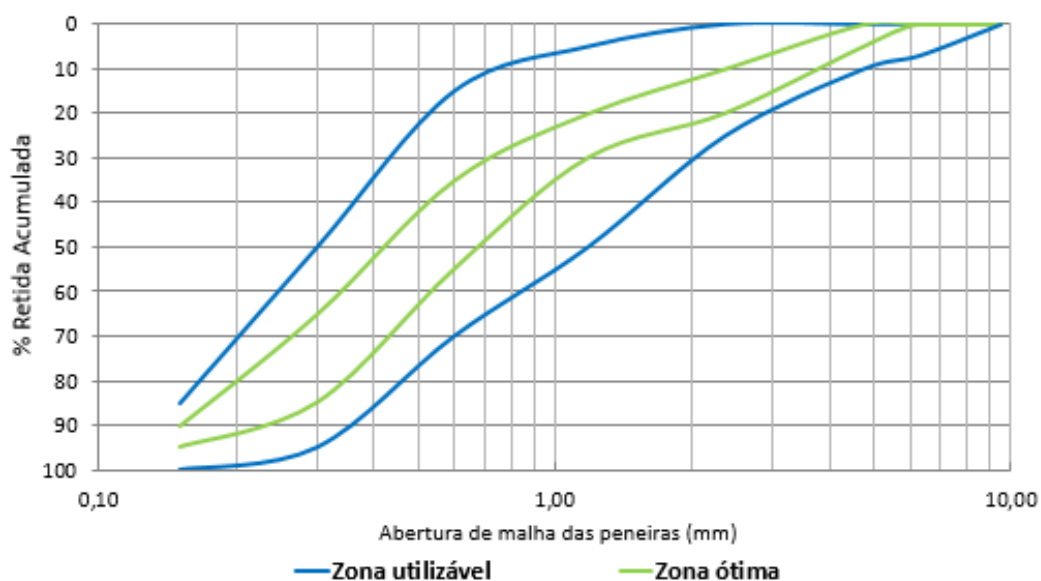
Nota 1: O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.

Nota 2: O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.

Nota 3: O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

(fonte: ABNT, 2009, p. 5)

Figura 2 – Limites da composição granulométrica para agregados miúdos



(fonte: adaptado da ABNT, 2009)

O módulo de finura é definido pela NBR 9.935 (ABNT, 2011) como sendo a soma das porcentagens retidas acumuladas, em massa, de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100. A determinação do módulo de finura tem grande relevância na dosagem de concretos e argamassas. Ambrozewicz (2012) afirma que “O módulo de finura está relacionado com a área superficial do agregado e altera a área de molhagem, para uma determinada consistência [...] quanto menor o diâmetro das partículas, maior a área específica e maior a quantidade de água para mesma consistência.”

A dimensão máxima característica do agregado está associada à distribuição granulométrica deste. Sua determinação é dada pela abertura nominal, em milímetros, da malha da primeira peneira da série normal na qual o agregado apresenta porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5%, em massa (NBR 9.935, 2011). Mehta e Monteiro (1994) afirmam que, quanto maior a dimensão máxima de um agregado, menor será a superfície que necessitará ser coberta pela pasta de cimento, para certa relação água/cimento.

A areia natural britada apresenta granulometria mais homogênea, com grãos de superfície mais áspera e irregular, além de não possuir matéria orgânica e ter maior teor de material pulverulento em sua composição, se comparada à areia natural extraída de rio (CECHIN *et al.*, 2016). Durante o ensaio granulométrico, o material passante na peneira 0,075 mm é o material pulverulento, definido e limitado pela NBR 7211 (ABNT, 2009a) em 3% para concretos com



desgaste superficial e 5% para concretos protegidos deste desgaste. Esta mesma norma salienta que a porcentagem de material pulverulento pode ser aumentada em casos que este material tenha sido gerado totalmente durante o processo de britagem (ABNT, 2009, p.6):

Quando o material fino que passa através da peneira 0,075 mm por lavagem, for constituído totalmente de grãos gerados durante a britagem da rocha, os valores podem ter seus limites alterados de 3% para 10% (para concreto submetido a desgaste superficial) e de 5% para 12% (para concreto protegido de desgaste superficial) desde que seja possível comprovar por apreciação petrográfica que os grãos constituintes acima de 150  $\mu\text{m}$  não geram finos que interferem nas propriedades do concreto.

### **3.5.2 Características da forma**

Além dos requisitos da norma NBR 7.211 (ABNT, 2009a) para agregados miúdos do concreto, há outras considerações que devem ser abordadas, devido a influência do agregado no comportamento dos revestimentos. A característica de forma, representada pelo arredondamento e esfericidade do agregado, é de grande relevância para argamassas de revestimento (PANDOLFO, 2009). De modo geral, técnicas de análise por imagens vêm sendo utilizadas para esta caracterização e, posteriormente, a determinação desses índices se dá por meio de modelos matemáticos, no entanto, até o momento, poucas pesquisas foram desenvolvidas no assunto, fazendo com que os efeitos de forma sejam incorporados nas dosagens de argamassas e concretos por meio do empacotamento ou de área superficial do agregado (QUIROGA; FOWLER, 2004).

Para Tristão (2005), quando se trabalha com grãos não esféricos, não é suficiente a caracterização do agregado apenas pela distribuição granulométrica, visto que composições granulométricas diferentes irão conduzir a diferentes índices de vazios. Este mesmo autor afirma que, quanto maior a esfericidade e o arredondamento, menor será o índice de vazios das areias.

#### **3.5.2.1 Arredondamento**

O arredondamento é uma medida dependente da rugosidade externa das partículas. Partículas rugosas dificultam o escoamento da argamassa pois aumentam a força de atrito entre os grãos (TRISTÃO, 2005). Embora o conceito de arredondamento e esfericidade possa ser confundido, este mesmo autor afirma que, enquanto o arredondamento se relaciona com a perda de vértices

e arestas, isto é, o grau de curvatura dos cantos, o grau de esfericidade mostra o quanto o grão se aproxima da forma esférica.

Quiroga e Fowler (2004) afirmam também que, assim como a distribuição granulométrica influencia na quantidade de pasta necessária na mistura, o arredondamento e a rugosidade das partículas também é de grande relevância, visto que partículas de forma mais arredondada e lisa requerem menos pasta para cobrir os grãos e atingir determinada trabalhabilidade.

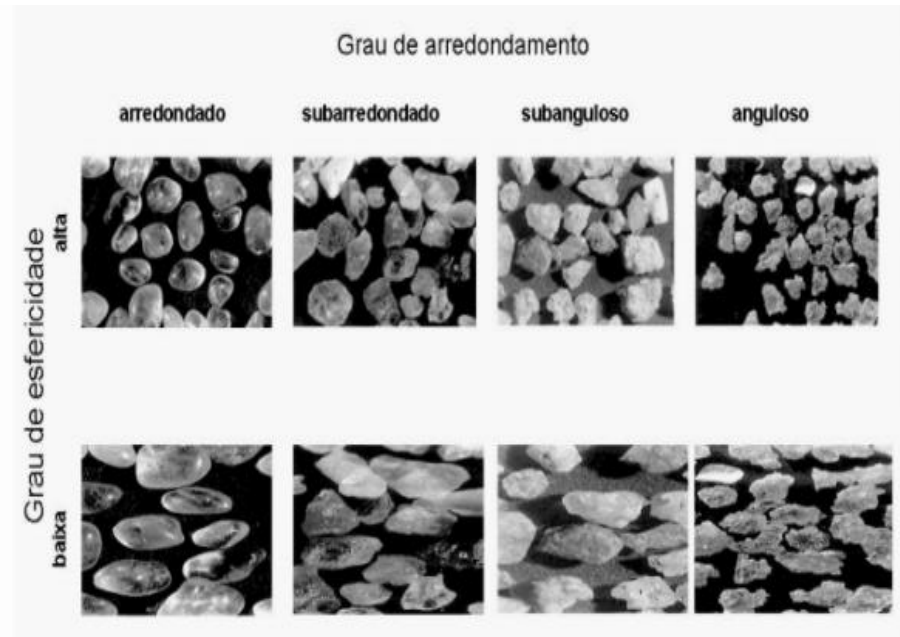
#### 3.5.2.2 Esfericidade

A esfericidade pode ser expressa como a relação entre a área da superfície do grão pela área da superfície da esfera de mesmo volume do grão (TRISTÃO, 2005). Quanto mais próximo do formato esférico for o grão, maior será a trabalhabilidade da argamassa para um mesmo consumo de água (CAMPOS, 2007).

Embora existam métodos laboratoriais mais precisos, a NBR 7389-1 (ABNT, 2009b) sugere a classificação dos agregados quanto à esfericidade e o arredondamento por meio de comparação visual, a olho nu ou com o auxílio de instrumento ótico, com as amostras apresentadas na

Figura 3. Seguindo o critério normativo, a forma dos grãos pode ser classificada quanto à esfericidade, em alta ou baixa, e quanto ao arredondamento, em anguloso, subanguloso, subarredondado ou arredondado.

Figura 3 – Padrão de classificação do agregado quanto à esfericidade e arredondamento



(fonte: NBR 7.389-1, 2009, p. 3)

Ainda que já tenha se tornado obsoleta, a versão anterior da NBR 7.389 (ABNT, 1992 – cancelada em 2009) apresentava em seu conteúdo a Figura 4, na qual verifica-se a mesma proposta de classificação do agregado da norma vigente, porém, com maior detalhamento de imagem do grão, fato que pode auxiliar na categorização do agregado.

Figura 4 – Detalhamento quanto à classificação do agregado



(fonte: NBR 7.389, 1992)

### 3.5.2 Agregado britado

São agregados que conservam a natureza da rocha de origem, porém sofreram algum tipo de beneficiamento e/ou britamento (CABRAL, 2007). Este mesmo autor afirma ainda que a utilização desse material só é possível graças à evolução dos britadores (a exemplo o britador VSI), que passaram a produzir grãos de formatos menos lamelares e dentro das especificações normativas quanto à granulometria.

A produção de grãos britados com melhores características de forma permitiu a realização de estudos quanto à viabilidade de utilização destes em concretos e argamassas. Autores como Kuck (2003) e Santos (2009) avaliaram as características do agregado britado, enquanto Costa (2005) avaliou a utilização destes no concreto. Estudos feitos por Holsbach (2004) e Silva (2007) apresentaram, além da caracterização do agregado, resultados da utilização deste em argamassas de assentamento e de revestimento, respectivamente.

Ainda que a utilização do agregado britado venha se intensificando por conta da questão ambiental e de custo, Costa (2005) salienta sua preocupação quanto ao aspecto tecnológico, enfatizando a necessidade de estudos a seu respeito. Em análises feitas em concreto convencional na cidade de Pato Branco - PR, Viacelli (2012) concluiu que, mesmo fazendo uso da substituição total do agregado miúdo por agregado britado de basalto, a resistência do concreto não apresentou diferenças significativas, ao passo que, se avaliado seu custo de produção, houve um melhor desempenho, sendo, portanto, a substituição viável técnica e economicamente.

Teodoro (2013) tem as mesmas preocupações que Costa (2005) quanto a utilização desse agregado em concreto, porém, ela salienta que, uma vez feita a dosagem e atingidos os resultados desejados, esta areia apresenta características físicas e químicas constantes, o que passa a ser uma vantagem em relação à areia extraída de rio.

Estudos feitos em argamassa de revestimento por Cechin *et al.* (2016) concluíram ser viável a utilização de agregado britado como componente da mistura. Esses autores verificaram que a areia britada é uma boa alternativa para substituição da areia extraída de rio, visto que as argamassas aumentaram sua resistência à tração na flexão e à compressão quando apresentaram agregado britado em sua composição.

## 4 ARGAMASSA

A NBR 7.200 (ABNT, 1998) define argamassa como sendo uma mistura homogênea de aglomerantes, agregado miúdo e água, com capacidade de aderência e de endurecimento. Ambrozewicz (2012) reitera esta definição e diz que cimento e cal são classificados como aglomerantes que podem ou não ser utilizados em uma mesma argamassa, de acordo com sua destinação. Recena (2012, p. 67) salienta que “[...] argamassa é hoje o material mais utilizado no assentamento de elementos de alvenaria e em seu revestimento por estar internalizada na cultura da construção civil.” Chama-se de pasta a mistura entre aglomerante e água; quando se adiciona água em excesso a esta mistura obtemos um produto denominado nata; se adicionado agregado miúdo a esta nata, obtém-se uma argamassa (PINTO, 1996).

### 4.1 MATERIAIS CONSTITUINTES DA ARGAMASSA

Aglomerante, agregado miúdo e água são os principais constituintes de um traço de argamassa, e as proporções entre eles podem ser dadas em peso ou volume e, embora este último seja a maneira tradicionalmente utilizada, a dosagem em peso garante maior assertividade quanto à quantidade consumida e a qualidade do produto final (AMBROZEWICZ, 2012).

#### 4.1.1 Aglomerante

Carvalho (2012) define como aglomerante o material responsável por, quando adicionado água, formar uma pasta que promove a união entre os grãos do agregado. Alves (1987) entende por aglomerante o material ativo que promove a ligação entre os grãos do material inerte (agregado). A cal é considerada o mais antigo dos aglomerantes, tendo registros de sua utilização desde a construção das grandes pirâmides; hoje, o cimento Portland pode ser considerado como a evolução desse primeiro aglomerante (RECENA, 2012). Mehta e Monteiro (1994) classificam os aglomerantes em:

hidráulicos: aglomerantes que endurecem por meio de reações com a água e formam um produto resistente à ela quando em estado endurecido;

não hidráulicos: são aglomerantes, como por exemplo a cal hidratada, que o produto final não resiste à água caso não seja feita a utilização de materiais pozolânicos na mistura.

#### 4.1.2 Cimento

Cimento Portland é a denominação técnica para o material chamado comumente de cimento, criado e patenteado em 1824 por um construtor inglês que utilizava pedra de cor acinzentada originada da ilha de Portland, servindo de inspiração para seu nome (AMBROZEWICZ, 2012).

No Brasil é comum a designação de cimento Portland simplesmente por CP seguido de algarismos romanos de I a V, conforme o tipo de cimento, pois cada algarismo representa uma composição diferenciada. Mehta e Monteiro (1994) seguem a classificação das Normas Brasileiras, que dividem os cimentos em cinco grandes categorias:

- a) CP I – Cimento Portland Comum;
- b) CP II – Cimento Portland Composto;
- c) CP III – Cimento Portland de Alto-forno;
- d) CP IV – Cimento Portland Pozolânico;
- e) CP V – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial.

O cimento CP II, além da adição de sulfato de cálcio durante a operação de moagem do clínquer Portland, recebe certos teores de adições (pozolana, escória de alto forno ou fíler calcário), o que o diferencia dos demais cimentos Portland (NBR 11.578, 1991).

A NBR 11.578 (ABNT, 1991) afirma ainda que a categoria de cimento CP II é empregada em uso geral, principalmente quando se deseja moderada resistência ao sulfato ou moderado calor de hidratação, visto que seu teor de  $C_3S$  e  $C_3A$  (responsáveis pelo elevado calor de hidratação) são limitados, bem como sua finura. Ela define também a composição do cimento para que este seja caracterizado como cimento composto, conforme apresentado na Tabela 2. Pode-se acrescentar que o CP II F é um dos cimentos mais puros, dentre os cimentos encontrados no mercado, depois do CP V (que não é utilizado em argamassa), pois contém apenas 6-10% de fíler calcário.

Tabela 2 – Tabela dos componentes do cimento Portland composto

Sigla	Classe de resistência	Componentes (% em massa)			
		Clinker + sulfatos de cálcio	escória granulada de	Material pozolânico	Material carbonático
CP II-E	25	94-56	6-34	-	0-10
	32				
	40				
CP II-Z	25	94-76	-	6-14	0-10
	32				
	40				
CP II-F	25	94-90	-	-	6-10
	32				
	40				

(fonte: ABNT, 1991, p. 2)

### 4.1.3 Cal hidratada

A mistura de cal ao traço de argamassa faz com que esta desenvolva características bastante importantes, como maior plasticidade (dada em virtude da pequena dimensão de seus grãos), maior retenção de água (devido à grande superfície específica de suas partículas), incorporação de areia (facilidade que a pasta com cal hidratada tem de envolver os grãos do agregado e por consequência unir os mesmos) e capacidade de absorver deformações (PINTO, 1996). A NBR 7.175 (ABNT, 2003) classifica a cal hidratada em três categorias, CH-I, CH-II e CH-III, de acordo com suas composições, apresentadas na Tabela 3(exigências físicas) e na Tabela 4 (exigências químicas).

Tabela 3 – Exigências físicas da cal hidratada

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600 mm	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %
	Peneira 0,075 mm	≤ 10 %	≤ 15 %	≤ 15 %
Retenção de água		≥ 75 %	≥ 75 %	≥ 70 %
Incorporação de areia		≥ 3,0	≥ 2,5	≥ 2,2
Estabilidade		Ausencia de cavidades ou protuberâncias		
Plasticidade		≥ 110	≥ 110	≥ 110

(fonte: ABNT, 2003, p. 3)

Tabela 4 – Exigências químicas da cal hidratada

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )	Na fabrica	≤ 5 %	≤ 5 %	≤ 13 %
	No depósito	≤ 7 %	≤ 7 %	≤ 15 %
Óxido de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaO + MgO)		≤ 10 %	≤ 15 %	≤ 15 %
Óxidos totais na base de não-voláteis (CaOr + MgOr)		≥ 90 %	≥ 88 %	≥ 88 %

(fonte: adaptada de ABNT, 2003, p. 3)

## 4.2 PROPRIEDADES

As argamassas são utilizadas para diversas aplicações na construção civil, como assentamento e revestimento para elementos de alvenaria, revestimento de estrutura de concreto e execução de contrapisos. Tendo em vista o foco deste trabalho, Ambrozewicz (2012) define que a argamassa de revestimento “Serve para revestir paredes e resistir a pequenas deformações. O acabamento fica plano, uniforme e com aspecto agradável para os usuários.” Segundo Carasek (2007), os principais requisitos e propriedades das argamassas com essa destinação são:

- a) resistência mecânica;
- b) trabalhabilidade;
- c) baixa permeabilidade à água;
- d) aderência;
- e) baixa retração;
- f) capacidade de absorver deformações.

As características e propriedades das argamassas podem ser determinadas e categorizadas de acordo com a classificação proposta pela NBR 13.281 (ABNT, 2005). As propriedades relevantes para estudo da substituição de agregado miúdo na argamassa são classificadas em propriedades no estado fresco e propriedades no estado endurecido.



## 4.2.1 Propriedades no estado fresco

As propriedades relevantes para a argamassa em estado fresco são descritas a seguir.

### 4.2.1.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade das argamassas é avaliada por meio do índice de consistência, definido pela NBR 13.276 (ABNT, 2016), e do squeeze-flow, definido pela NBR 15.839 (ABNT, 2010). Carasek (2007, p. 875) define que a “Trabalhabilidade é a propriedade das argamassas no estado fresco que determina a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas, em uma situação homogênea.” Esta mesma autora (2007, p. 875) afirma que “A trabalhabilidade é uma propriedade complexa, resultante da conjunção de diversas outras propriedades, tais como: consistência, plasticidade, retenção de água e de consistência, coesão, exsudação, densidade de massa e adesão inicial. ”

Carasek (2007, p. 882) afirma ainda que quanto mais leve for a argamassa, mais trabalhável será a longo prazo, o que facilita sua utilização e gera aumento de produtividade. Dentre as propriedades acima citadas, a alteração de agregado miúdo deve gerar maior influência sobre a densidade de massa, visto que a massa específica da areia britada de basalto é maior que da areia natural quartzosa (CAMPOS *et al.*, 2007).

### 4.2.1.2 Retenção de água

A retenção de água é a propriedade da argamassa que está associada à capacidade da argamassa fresca de manter a sua trabalhabilidade quando sujeita a ações que provocam perda da água de amassamento, seja por evaporação ou por absorção de água da base (CARASEK, 2007). Esta mesma autora afirma que esta propriedade também influencia no estado endurecido das argamassas, visto que as reações químicas de endurecimento dos aglomerantes necessitam de certa quantidade de água. Se a substituição da areia natural quartzosa por areia britada de basalto demandar maior quantidade de água na mistura, maior também será o volume de água a ser evaporado, o que, de acordo com Recena (2012, p. 97), gera maior retração e, por consequência, aparecimento de fissuras. A capacidade das argamassas em reter água diminui a ocorrência dessas fissuras, visto que a água evapora mais lentamente.

## 4.2.2 Propriedades no estado endurecido

As propriedades da argamassa de maior relevância no estado endurecido são descritas a seguir.

### 4.2.2.1 Resistência mecânica

Se comparadas ao concreto, as argamassas são pouco resistentes à compressão, no entanto esta continua a ser uma propriedade relevante, seja para argamassa de assentamento ou revestimento. A NBR 13.279 (ABNT, 2005) recomenda que a resistência mecânica de argamassas seja determinada aos 28 dias por meio dos dois ensaios descritos nesta norma, de resistência à compressão e de resistência à tração na flexão. Este último é de grande relevância para argamassas, devido às solicitações da base onde ela será ancorada (RECENA, 2012).

### 4.2.2.2 Retração

O estudo deste fenômeno está ligado à qualidade e durabilidade das edificações. Após ser aplicada sobre a base, a argamassa é impedida de se retrair por conta da aderência, o que acaba levando à fissuração do revestimento (ALVES, 1987). Parte da retração é causada pelas reações químicas da hidratação do cimento, mas a maior parte é causada pela secagem. Secagem esta que é diretamente ligada à quantidade de água da mistura, o que torna este ensaio de grande relevância, visto que a areia natural britada possui maior teor de finos e, portanto, necessita de mais água para se atingir uma mesma consistência. Se a secagem for lenta, a argamassa tem tempo suficiente para atingir a resistência à tração necessária para suportar as tensões internas que surgem (CARASEK, 2007).

### 4.2.2.3 Módulo de elasticidade

A capacidade de absorver deformações é um fator muito importante nas argamassas, visto que elas são utilizadas para revestir elementos de diferentes naturezas, ou seja, elementos com diferentes comportamentos provocados pela ação térmica (RECENA, 2012). Este mesmo autor afirma que, de modo geral, argamassas com grande deformabilidade, ou seja, baixo módulo de elasticidade, apresentam baixa resistência à compressão. Devido à proposta de alteração de agregado da argamassa, é bastante provável que esta mudança influencie no módulo de

elasticidade, visto que o agregado é quem rege o módulo de elasticidade, uma vez que a pasta é bastante deformável (COSTA, 2005).

### 4.3 TIPOS DE ARGAMASSA

As argamassas podem ser classificadas com relação a vários critérios; alguns desses são: tipo de aglomerante, número de aglomerantes, densidade de massa, consistência e função que ela desempenhará na construção (CARASEK, 2007). Quanto à classificação relacionada ao tipo de aglomerante, os tipos mais comuns de argamassa são: argamassa de cal, argamassa de cimento e argamassa mista (AMBROZEWICZ, 2012).

#### 4.3.1 Argamassa de cal

Foi o tipo de argamassa mais utilizado durante séculos, quando ainda não se conhecia o cimento Portland, sendo uma argamassa muito plástica e que geralmente é utilizada em alvenaria não estrutural (AMBROZEWICZ, 2012). Esta argamassa, quando comparada à argamassa de cimento Portland, tem seu endurecimento mais lento e menor resistência mecânica, o que lhe proporciona menor módulo de elasticidade, ou seja, menor rigidez, o que contribui para sua maior durabilidade (CINCOTTO *et al.*, 2007).

#### 4.3.2 Argamassa de cimento

São argamassas que adquirem maior resistência e mais rapidamente, por isso são utilizadas em argamassas de chapisco e revestimentos impermeáveis. Ainda sobre esta argamassa, Recena (2012) afirma:

A grande resistência mecânica, esperada pelo elevado consumo de cimento, eleva igualmente o módulo de deformação desse tipo de argamassa tornando-a mais rígida, menos deformável e mais suscetível à retração, não raro com intensa fissuração quando aplicadas em revestimento.

### 4.3.3 Argamassa mista

Argamassas mistas apresentam uma mistura dos aglomerantes cal e cimento, resultando em um composto que tem nas suas propriedades as somas das características já citadas; é utilizada em alvenarias estruturais, contrapisos, assentamento cerâmico, pisos e emboços de paredes e tetos (AMBROZEWICZ, 2012).

A presença do cimento à esta mistura se deve ao fato de que, com ele, o tempo de pega da mistura é reduzido, permitindo que o acabamento de superfícies seja realizado em um prazo menor; e a resistência à umidade é maior, viabilizando seu emprego em situações específicas (RECENA, 2012). Este mesmo autor afirma ainda:

[...] a cal, embora contribua para a resistência mecânica, é empregada em função de sua grande plasticidade e capacidade de retenção de água, permitindo obtenção de argamassa com grande volume de pasta, mas com resistência mecânica muito menor do que a esperada em argamassas de mesmo volume de pasta produzidas apenas com cimento Portland e, conseqüentemente, com menor módulo de deformação como desejável.

## 5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A revisão bibliográfica dos capítulos anteriores apresentou os aglomerantes e agregados utilizados para produção de argamassa; e, tendo em vista a questão ambiental e financeira, faz-se necessário estudos sobre novas matérias primas. A fim de manter o cunho prático deste trabalho, os materiais utilizados para os ensaios são os comumente utilizados na região a ser beneficiada com a utilização do agregado miúdo proveniente de basalto: a Serra Gaúcha.

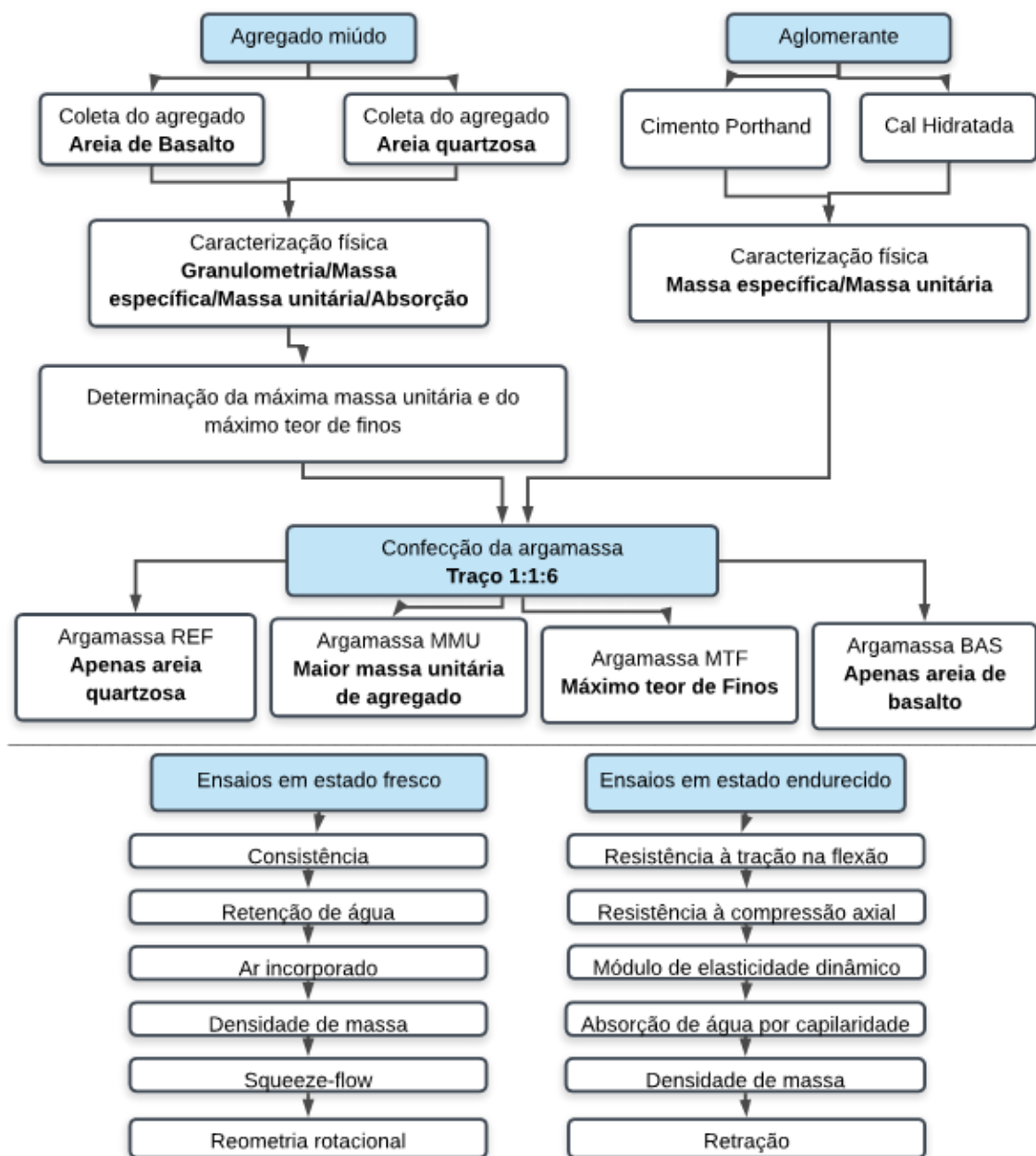
### 5.1 METODOLOGIA

Este estudo visa avaliar a possibilidade de substituição de areia natural quartzosa por areia britada de basalto, sem que haja alteração das propriedades da argamassa. A fim de fazer uso das propriedades da cal hidratada citadas anteriormente e manter a relação aglomerante:agregado em 1:3 (RECENA, 2012), adotou-se o traço 1:1:6 (cimento Portland: cal hidratada: agregado miúdo, em volume de materiais secos). A variável dentro do traço proposto é o agregado miúdo, o qual teve sua constituição dada por quatro diferentes porcentagens entre areia natural quartzosa e areia britada de basalto.

No decorrer do trabalho são apresentados os comportamentos das quatro argamassas, a primeira, apenas com areia natural quartzosa, ou seja, 0% de areia britada de basalto (esta é a argamassa referência, chamada de argamassa REF). A segunda argamassa, chamada de argamassa MTF (Maior Teor de Finos), consiste de uma mistura entre os agregados que resulta no máximo teor de finos, dentro da zona ótima da curva granulométrica determinada na NBR 7.211 (ABNT, 2009a); sendo que esta mescla de materiais tem por objetivo não apenas atingir o teor ótimo de finos, mas também atender à restrição da norma que permite um máximo de 12% de material pulverulento (de dimensão menor que 0,075 mm) na mistura. A terceira argamassa, chamada de argamassa MMU (Máxima Massa Unitária), consiste da mistura entre os dois agregados com a maior massa unitária, massa essa determinada conforme procedimentos recomendados na NBR NM 45 (ABNT, 2006). Por fim, a quarta argamassa, constituída apenas de areia de basalto, será chamada de argamassa BAS (Basalto).

A partir das definições já citadas, foi definida a matriz experimental do trabalho (Figura 5), na qual são representadas esquematicamente as etapas, variáveis e os ensaios realizados neste estudo.

Figura 5 – Matriz experimental



(fonte: elaborado pelo autor)

## 5.2 MATERIAIS

É bastante comum em argamassas de revestimento, além da utilização do cimento, adicionar cal hidratada ao traço da mesma, visto que esta apresenta algumas propriedades positivas para tal finalidade. Água e agregado miúdo são os últimos dois componentes básicos para confecção de argamassa; agregado este que será parcialmente substituído por areia industrial de basalto. Os materiais utilizados estão descritos nos itens a seguir.

### 5.2.1 Cimento

A classe de cimento comumente utilizada pelas empresas da região da Serra do Rio Grande do Sul é o CP II-F 40 (informação coletada na região<sup>1</sup>). Este é definido pela NBR 11.578 (ABNT, 1991) como sendo a mistura de cimento Portland com fíler calcário. A fim de reproduzir as condições da região, foi o cimento utilizado para desenvolvimento dos ensaios em laboratório. Sua massa específica foi determinada em laboratório conforme a NBR NM 23 (ABNT, 2000) e as demais características físicas e químicas foram obtidas com seu fabricante, sendo apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Características físicas e químicas do cimento CP II-F 40 utilizado

Cimento CP II-F40		
Características físicas		Resultados
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		3,06
Finura - # 200 (%)		0,00
Finura - # 325 (%)		0,48
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		4521,5
Início de pega (min.)		223
Fim de pega (min.)		283
Resistência à compressão (MPa)	01 dia	23,7
	03 dias	34,3
	07 dias	40,0
	28 dias	47,9
Características químicas		Resultados
Teor de MgO (%)		5,90
Teor de SO <sub>3</sub> (%)		3,56
Perda ao fogo (%)		4,86

(fonte: adaptada das informações do fabricante e do autor)

<sup>1</sup> Informação coletada em empresas de construção e comércios da região da Serra do RS.

### 5.2.2 Cal Hidratada

Utilizou-se cal hidratada no traço adotado para os ensaios e esta teve sua quantidade fixada igualmente em todas as misturas. A cal hidratada CH III foi adquirida no comércio da região da Serra do RS, assemelhando-se ao que é empregado pelas empresas produtoras de argamassa. Sua massa específica foi determinada em laboratório conforme a NBR NM 23 (ABNT, 2000) e as demais características físicas e químicas foram obtidas com seu fabricante, sendo apresentadas na Tabela 6 e estando de acordo com as exigências das Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 6 – Características físicas e químicas da cal hidratada CH III utilizada

Cal Hidratada CH III	
Características físicas	Resultados
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,38
Finura - # 30 (% retida acumulada)	0,01
Finura - # 200 (% retida acumulada)	1,11
Características químicas	Resultados
Teor de CaOt + MgOt (%)	95,33
Teor de CO <sub>2</sub> (%)	7,05
Teor de CaO + MgO (%)	13,63
Teor de SiO <sub>2</sub> + RI (%)	2,53
Teor de CaO (%)	44,51
Teor de MgO (%)	27,35
Teor de SO <sub>3</sub> (%)	0,01
Perda ao fogo (%)	24,61

(fonte: adaptada das informações do fabricante e do autor)

### 5.2.3 Agregado Miúdo

Para este trabalho, utilizaram-se dois tipos de agregado miúdo, um deles, a areia natural quartzosa, a qual foi considerada como material referência, e o outro, a areia britada de basalto, a qual é a motivadora deste estudo.

#### 5.2.3.1 Areia natural quartzosa

A areia natural quartzosa, que a partir de agora será chamada apenas de areia, provém da extração do Rio Jacuí/RS, sendo esta a mesma que abastece o mercado consumidor da região da Serra do RS. Esta areia não teve sua composição granulométrica alterada e foi seca em estufa



até atingir constância de massa antes que sua caracterização física fosse feita. As características do agregado estão apresentadas na Tabela 7, bem como as normas utilizadas para sua obtenção.

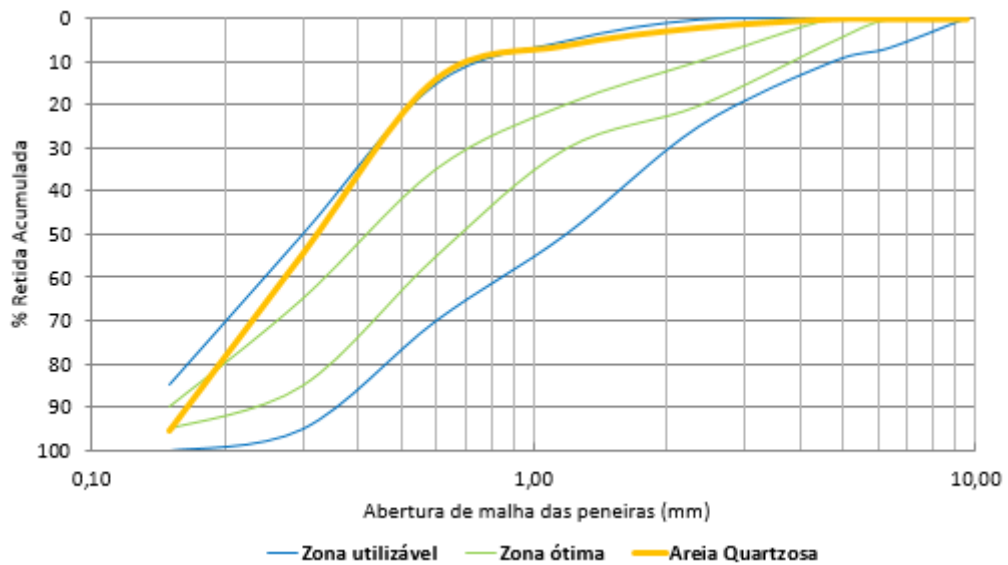
Tabela 7 – Caracterização física da areia natural quartzosa

Areia Natural Quartzosa - Caracterização física			
Ensaio	Resultados		Norma
	<i>Abertura (mm)</i>	<i>% Retida</i>	<i>% Retida acumulada</i>
Composição granulométrica	4,75	0	0
	2,36	2	2
	1,18	4	6
	0,6	7	13
	0,3	41	54
	0,15	41	95
	Fundo	5	100
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		2,53	NBR NM 52/2009
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )		1,50	NBR NM 45/2006
Absorção (%)		2,00	NBR NM 30/2001
Dimensão máxima (mm)		2,36	NBR NM 248/2003
Módulo de finura		1,70	NBR NM 248/2003
% Passante na peneira 200		3,5	NBR NM 46/2001

(fonte: elaborado pelo autor)

Na Figura 6, que apresenta a distribuição granulométrica da areia quartzosa, é possível constatar a carência de grãos com dimensões acima de 0,6 mm, assim como também é pequena a porcentagem de finos (material passante na peneira 0,15 mm). Esta areia tem mais de 80% de seu material com dimensão dos grãos entre 0,15 e 0,6 mm, chegando ao limite da zona utilizável recomendada pela NBR 7.211 (ABNT, 2009a).

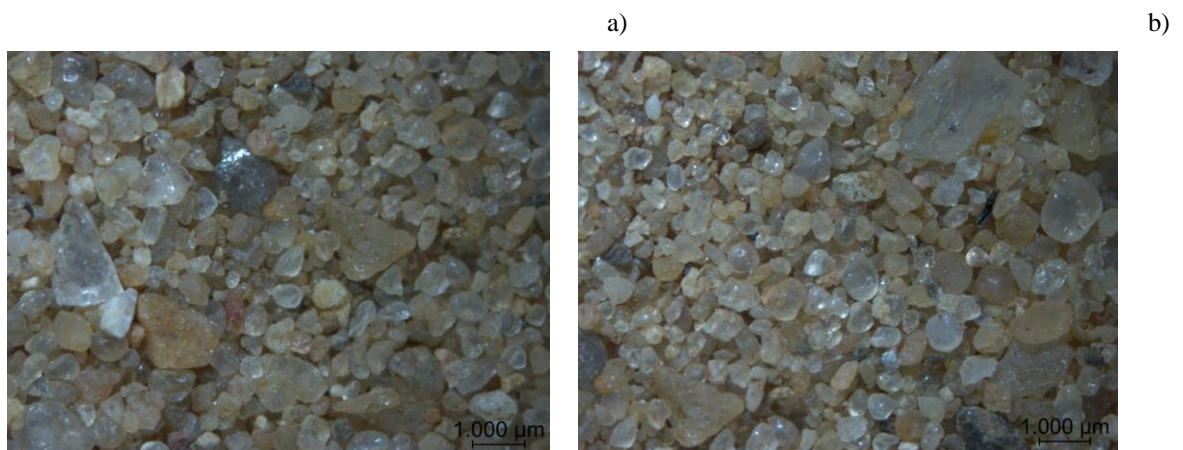
Figura 6 - Distribuição granulométrica da areia quartzosa



(fonte: elaborado pelo autor)

Este agregado foi submetido à análise em microscópio no LAMTAC/NORIE, permitindo boa visualização quando à forma dos grãos que o compunham. Seguindo a classificação proposta pela NBR 7389 (ABNT, 2009), o agregado quartzoso utilizado nos ensaios, e representado nas imagens da Figura 7, é classificado visualmente quanto ao grau de esfericidade como baixa e quanto ao grau de arredondamento como arredondado, portanto, esta é uma areia de baixa esfericidade e alto grau de arredondamento.

Figura 7 – Imagem (a) e (b) da areia quartzosa obtida em microscópio estereoscópico com aumento de 0,65x



(fonte: elaborado pelo autor)

#### 5.2.3.2 Areia britada de basalto

A areia britada de basalto, que a partir de agora será denominada apenas de areia de basalto, é extraída de uma pedreira localizada na cidade de Garibaldi/RS, distante aproximadamente 120 quilômetros da cidade de Porto Alegre. Esta pedreira trabalha exclusivamente com rocha basáltica e faz a utilização de explosivos para início do processo de extração das rochas. Após fragmentadas, as rochas são transportadas até os britadores de mandíbula onde, ao final do processo de britagem, são geradas até 12 granulometrias diferentes de materiais (brita e areia).

A coleta do material utilizado para os ensaios em laboratório foi feita no próprio local de armazenamento da pedreira (Figura 8), seguindo as recomendações da NBR NM 26 (ABNT, 2000), sendo necessário, portanto, a coleta de, no mínimo, 150 kg de agregado miúdo para realização de ensaios de dosagem e resistência mecânica.

Figura 8 – Área de armazenamento da areia basáltica na pedreira



(fonte: foto do autor)

Após a coleta, este material foi armazenado em laboratório para início dos ensaios. A fim de evitar que os resultados sofressem influência do transporte do material, foi realizado o quarteamento (Figura 9), conforme recomenda a NBR 10.007 (ABNT, 2004).

Figura 9 – Quarteamento da areia de basalto



(fonte: foto do autor)

As características do agregado basáltico e as normas utilizadas para sua determinação estão apresentadas na Tabela 8.

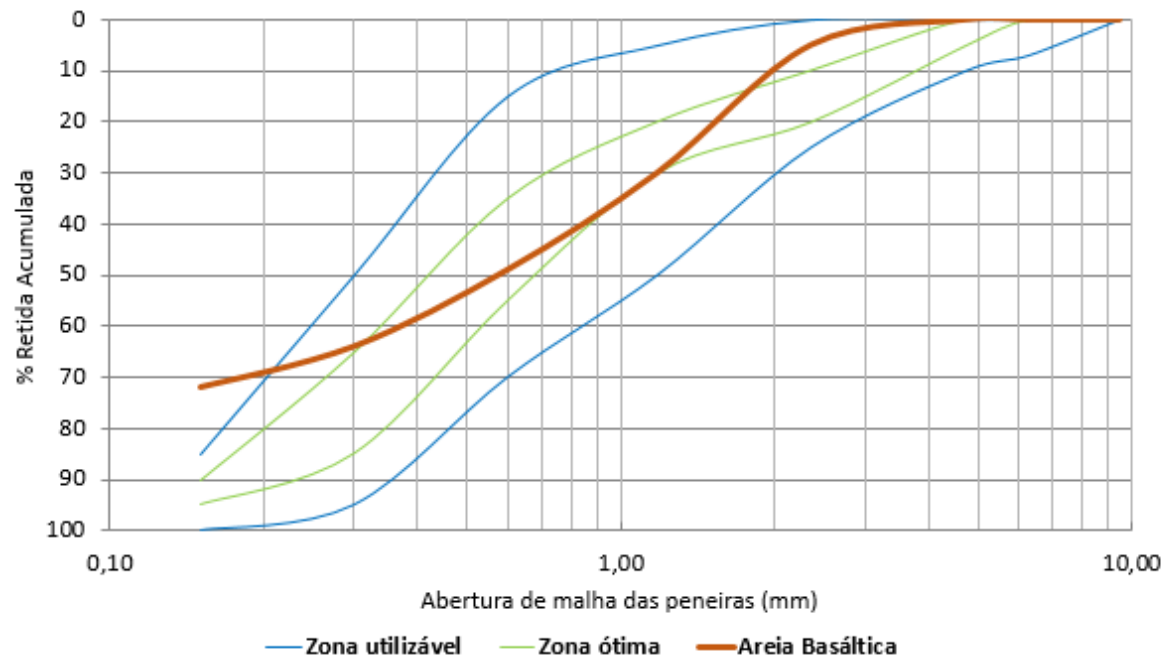
Tabela 8 – Caracterização física da areia basáltica

Areia Natural Basáltica - Caracterização física			
Ensaio	Resultados		
	Abertura (mm)	% Retida	% Retida acumulada
Composição granulométrica	4,75	0	0
	2,36	5	5
	1,18	25	30
	0,6	19	49
	0,3	15	64
	0,15	8	72
	Fundo	28	100
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		2,72	NBR NM 52/2009
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )		1,57	NBR NM 45/2006
Absorção (%)		3,30	NBR NM 30/2001
Dimensão máxima (mm)		2,36	NBR NM 248/2003
Módulo de finura		2,20	NBR NM 248/2003
% Passante na peneira 200		23,0	NBR NM 46/2001

(fonte: elaborado pelo autor)

Na Figura 10, que apresenta a distribuição granulométrica da areia basáltica, verifica-se uma divisão mais homogênea do material quando comparado à areia quartzosa; porém, é possível observar que há um excesso de finos, ou seja, o material passante na peneira com abertura de 0,15 mm representa 28% da amostra, ultrapassando o limite da zona utilizável.

Figura 10 – Distribuição granulométrica da areia basáltica

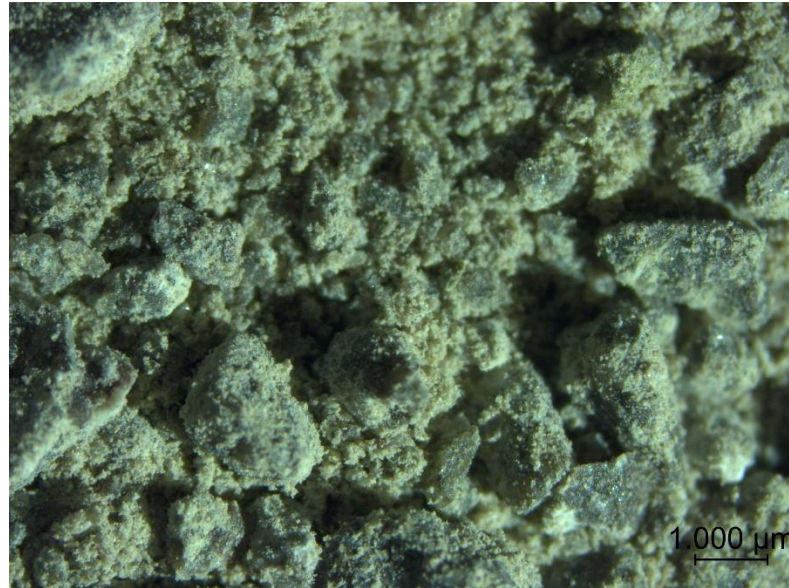


(fonte: elaborado pelo autor)

Devido à elevada concentração de material passante na peneira com abertura de 0,15 mm da areia basáltica, foi realizado também o peneiramento por lavagem, conforme recomendação da NBR NM 46 (ABNT, 2001). Este ensaio permitiu identificar a quantidade de material pulverulento (passante na peneira 0,075 mm) presente na amostra, resultando em 23%, valor este considerado elevado e acima do recomendado pela NBR 7.211 (ABNT, 2009a).

Assim como a areia quartzosa, a areia basáltica também foi caracterizada quanto à sua forma; no entanto, devido à grande quantidade de finos que “cobre” os grãos (Figura 11) foi necessário o peneiramento da amostra, facilitando a sua classificação.

Figura 11 – Areia basáltica vista em microscópio estereoscópico com aumento de 0,65x – sem qualquer beneficiamento



(fonte: elaborado pelo autor)

Conforme já citado, devido a sua grande quantidade de material pulverulento, separou-se o agregado basáltico utilizando as peneiras da série normal (4,75; 2,38; 1,18; 0,60; 0,30; 0,15 e fundo, respectivamente apresentadas na Figura 12). Seguindo a classificação proposta pela NBR 7.389 (ABNT, 2009b), o agregado basáltico utilizado nos ensaios é classificado quanto ao grau de esfericidade como baixo e quanto ao grau de arredondamento como anguloso, portanto, esta é uma areia de baixa esfericidade e baixo grau de arredondamento.

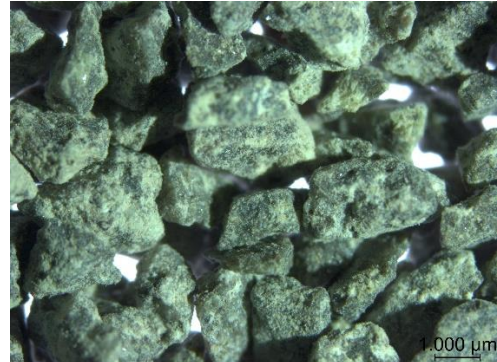
Figura 12 - Areia basáltica vista em microscópio estereoscópico com aumento de 0,65x – separada por peneiramento na série normal nas figuras (a) até (g).



a) 4,75mm



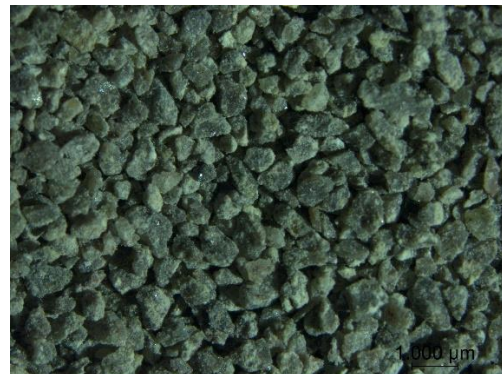
b) 2,38mm



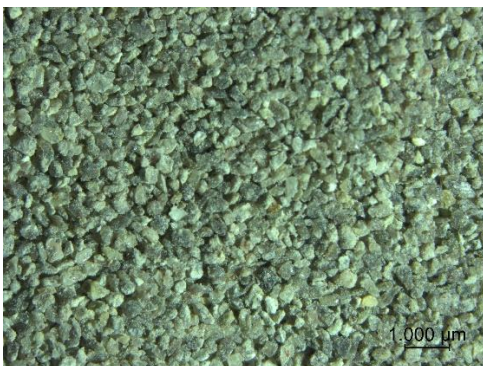
c) 1,18mm



d) 0,6mm



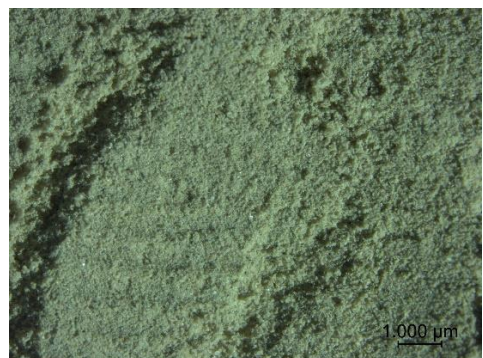
e) 0,3mm



f) 0,15mm



g) fundo



(fonte: elaborado pelo autor)

Quando comparados os dois agregados miúdos, caracterizados nas Tabela 7 e Tabela 8, observa-se que o agregado basáltico possui maior massa específica ( $2,72 \text{ g/cm}^3$ ) e maior grau de absorção de água (3,3%), devido à sua rocha de origem, rocha ígnea vulcânica (CAMPOS *et al.*, 2007). A maior massa unitária do agregado basáltico pode ser consequência de sua maior massa específica, visto que o agregado quartzoso possui grãos de formatos esféricos, o que gera melhor acomodação e, portanto, era de se esperar que este tivesse uma maior massa unitária quando comparado aos grãos de formato mais lamelar do basalto, já que este formato dificulta o preenchimento dos vazios. Além disso, também pode ser consequência da melhor distribuição granulométrica e do maior teor de finos.

O agregado basáltico possui maior módulo de finura (2,20), o que indica que este tem uma distribuição granulométrica com grãos mais grossos, ou seja, mesmo que os dois agregados tenham a mesma dimensão máxima (2,36 mm), este apresenta maior quantidade de material nas peneiras com maiores aberturas, sendo exceção apenas a peneira 150mm.

O menor módulo de finura da areia quartzosa (1,72) significa que existe uma maior concentração de material nas peneiras de menor abertura, e, portanto, este agregado pode ter uma maior área específica, o que tende a demandar mais água na mistura para obtenção de uma mesma consistência. Porém, mesmo o agregado basáltico tendo maior módulo de finura, a porcentagem de grãos passantes na peneira 0,15mm é de 28%, o que contribui para o aumento da área superficial deste agregado.

Ambos os agregados possuem parte de sua distribuição granulométrica situada fora da zona utilizável, o que justifica a sua união, a fim de se obter um agregado que atenda aos requisitos normativos. Nas Figura 13 e Figura 15 estão apresentadas as distribuições granulométricas das misturas dos agregados propostas para o trabalho.

#### 5.2.3.3 Agregado com Maior Teor de Finos (MTF)

Em virtude da composição granulométrica dos agregados natural e basáltico, se propõe neste trabalho utilizar um agregado denominado de Maior Teor de Finos (MTF). Esta composição granulométrica tem por preceito atender a dois requisitos da NBR 7.211 (ABNT, 2009a), o primeiro deles, conforme apresentado na Figura 2, é atender ao teor de finos estipulado como pertencente à zona ótima e o segundo é atender à quantidade de material passante na peneira de



0,075 mm (material pulverulento), o qual é limitado em 5% para concretos que não sofram de desgaste superficial, no entanto, esta mesma norma determina que, para agregados em que o material pulverulento for constituído totalmente de grãos gerados durante a britagem, caso da areia basáltica, esta quantidade pode chegar a até 12%.

Visto que o objetivo do trabalho é avaliar o agregado em argamassa de revestimento, material este que não sofrerá desgaste superficial, poder-se-ia utilizar uma mistura com 12% de material pulverulento; no entanto, o fator limitante foi o teor de finos da zona ótima, sendo 10% o valor máximo para o material passante na peneira de 0,15 mm de abertura de malha. Este limite foi atendido pela mistura de 82% de areia quartzosa com 18% de areia basáltica, obtendo-se uma granulometria com aproximadamente 10% de finos e 7% de material pulverulento (valores obtidos por meio de cálculos de ponderações das duas areias), acatando às duas condições propostas.

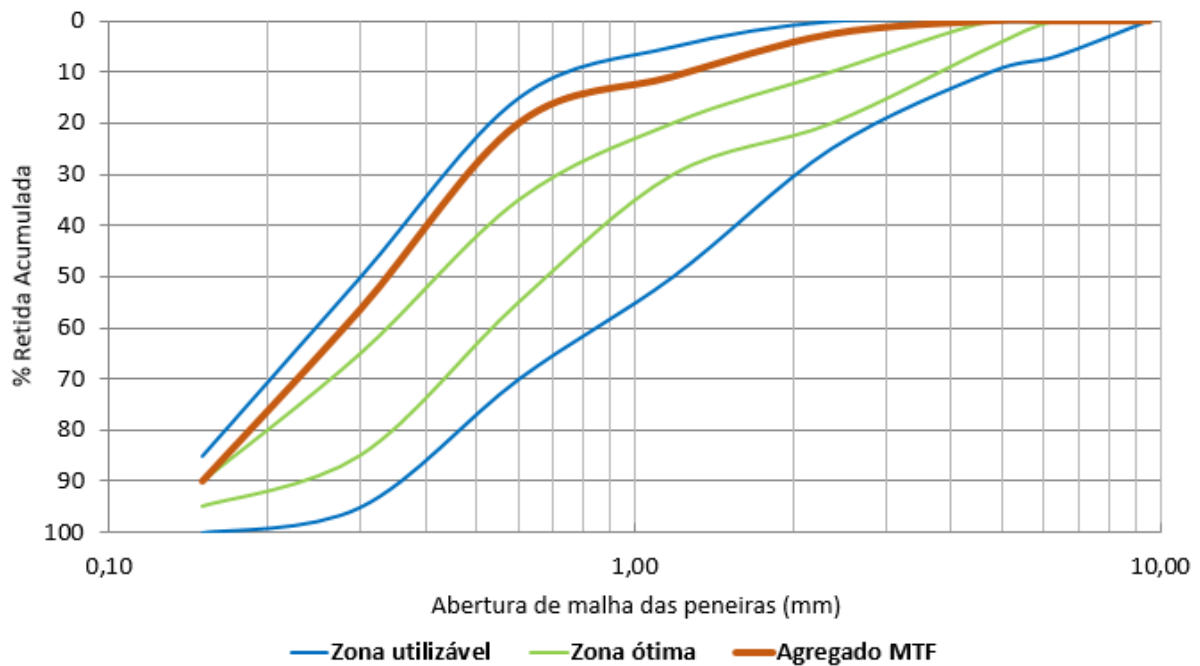
A Tabela 9 e a Figura 13 apresentam os valores de caracterização da areia com máximo teor de finos (MTF), que será utilizada como agregado na argamassa, e o gráfico de distribuição granulométrica da mesma, respectivamente. Quando comparado à areia quartzosa, observa-se que houve aumento das massas específica e unitária, bem como aumento no módulo de finura, devido ao acréscimo da areia basáltica e da melhor acomodação dos grãos.

Tabela 9 – Composição do agregado com MTF

Agregado com Maior Teor de Finos (MTF)			
Ensaio	Resultados		
	Abertura (mm)	% Retida	% Retida acumulada
Composição granulometria	4,75	0	0
	2,36	3	3
	1,18	8	11
	0,6	9	20
	0,3	35	55
	0,15	35	90
	Fundo	10	100
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		2,56	
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )		1,59	
Dimensão máxima (mm)		2,36	
Módulo de finura		1,79	
% Passante na peneira 200		7,0	

(fonte: própria do autor)

Figura 13 – Composição granulométrica do agregado MTF



(fonte: própria do autor)

#### 5.2.3.4 Agregado com Maior Massa Unitária (MMU)

Propõe-se um agregado que tenha a maior massa unitária obtida pela mistura do agregado natural e do basáltico. A adoção dessa propriedade da mistura dos agregados deve-se ao fato de que a maior massa unitária será obtida quando ocorrer o maior empacotamento possível entre as duas areias, ou seja, será obtida uma curva granulométrica bem graduada (continua), o que resulta em um menor número de vazios na argamassa. Quanto menor o número de vazios, menor será a quantidade de pasta necessária para envolver os grãos do agregado, diminuindo assim o consumo de aglomerante.

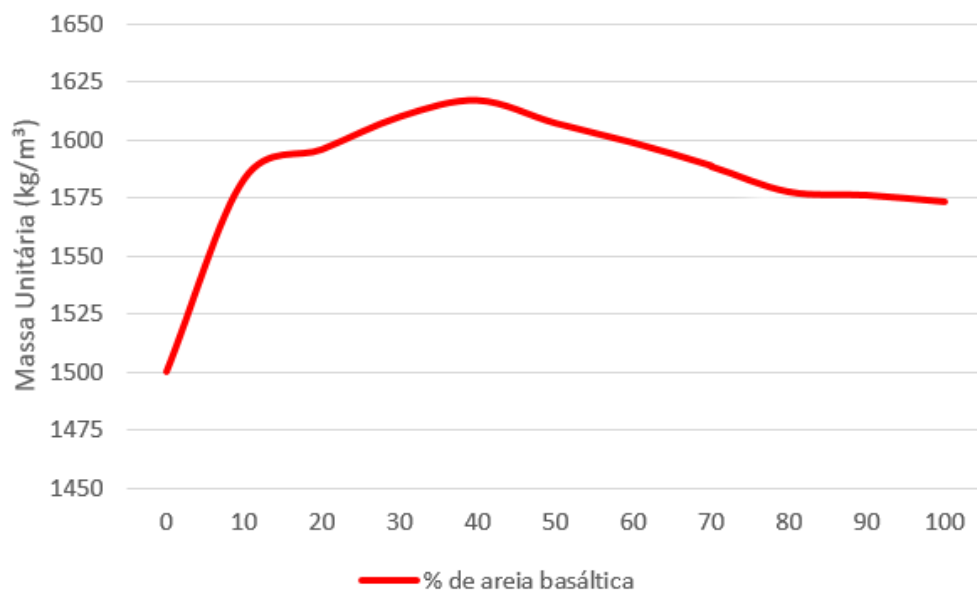
A composição granulométrica que gera a maior massa unitária da mistura entre o agregado quartzoso e o agregado basáltico foi obtida por meio de sucessivos ensaios normatizados pela NBR NM 45 (ABNT, 2006). Na Tabela 10 e Figura 14, nas quais estão representados os resultados do ensaio, pode-se observar que a maior massa unitária da composição foi obtida com a mistura de 40% de areia basáltica e 60% de areia quartzosa.

Tabela 10 – Massa unitária das misturas dos agregados

Determinação da Maior Massa Unitária					
Porcentagem de areia Basáltica (%)	1ª	2ª	3ª	Média	Massa unitária (kg/m³)
0	21,32	21,28	21,3	21,3	1500,00
10	22,58	22,42	22,48	22,48	1583,10
20	22,66	22,66	22,64	22,66	1595,77
30	22,86	22,84	22,86	22,86	1609,86
<b>40</b>	<b>22,96</b>	<b>22,96</b>	<b>22,98</b>	<b>22,96</b>	<b>1616,90</b>
50	22,82	22,84	22,8	22,82	1607,04
60	22,74	22,7	22,7	22,7	1598,59
70	22,6	22,54	22,56	22,56	1588,73
80	22,6	22,2	22,4	22,4	1577,46
90	22,4	22,38	22,3	22,38	1576,06
100	22,3	22,36	22,34	22,34	1573,24

(fonte: própria do autor)

Figura 14 – Influência da adição de areia basáltica na massa unitária do agregado miúdo



(fonte: própria do autor)

Como era de se esperar, esta composição granulométrica gerou resultados com valores intermediários entre os obtidos da areia quartzosa e da areia basáltica. A Tabela 11 e a Figura 15 apresentam os valores de caracterização da composição da areia com maior massa unitária (MMU), que será utilizada como agregado na argamassa, e o gráfico de distribuição granulométrico da mesma, respectivamente. O material passante na peneira 200 foi de 11,2%,

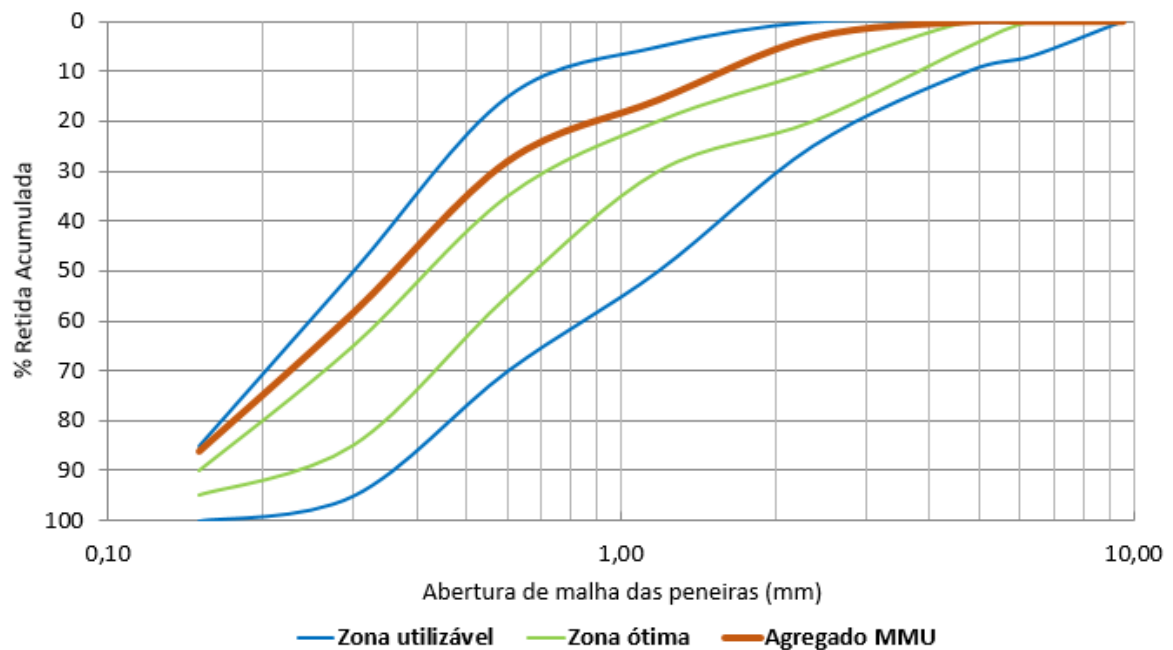
atendendo ao limite da NBR 7.211 (ABNT, 2009a), que é de 12%, no entanto, esta mesma norma define teores entre 5 e 10% para material retido da peneira com abertura de 0,150 mm como pertencente a zona ótima, teor esse ultrapassado pelo agregado MMU, já que possui 14% de seu material com essas dimensões.

Tabela 11 – Características físicas do agregado com MMU

Agregado com Maior Massa Unitária (MMU)			
Ensaio	Resultados		
Composição granulométria	Abertura (mm)	% Retida	% Retida acumulada
	4,75	0	0
	2,36	4	4
	1,18	12	16
	0,6	12	28
	0,3	30	58
	0,15	28	86
	Fundo	14	100
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,63		
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,62		
Dimensão máxima (mm)	2,36		
Módulo de finura	1,92		
% Passante na peneira 200	11,2		

(fonte: própria do autor)

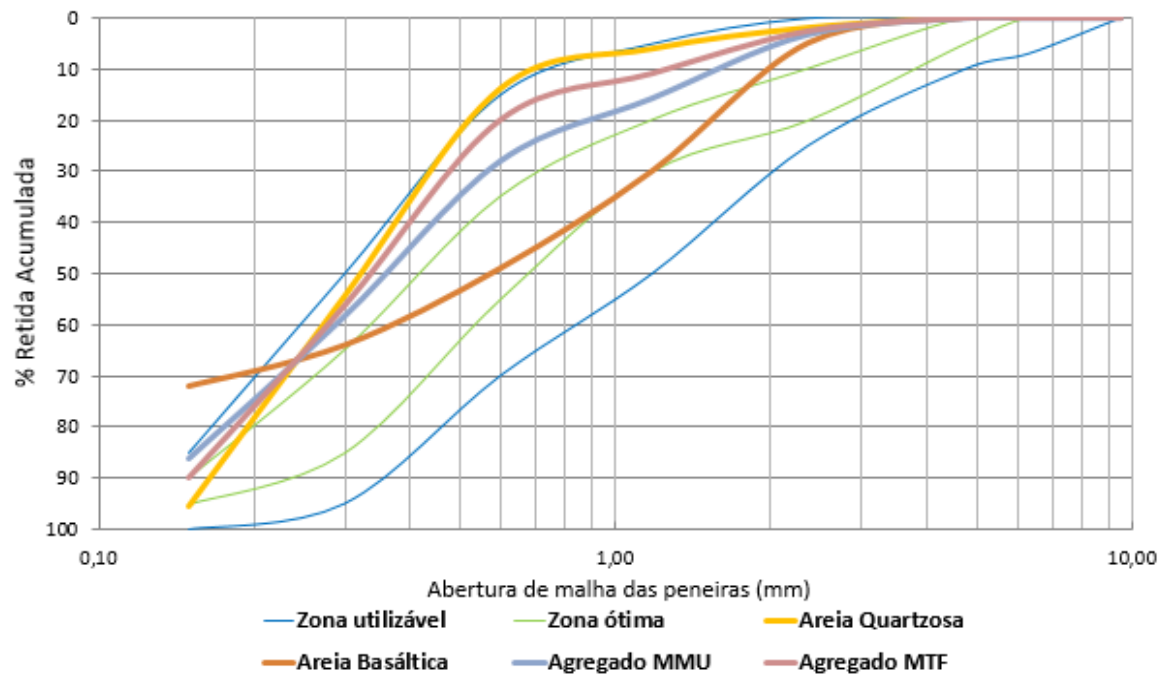
Figura 15 – Composição granulométrica do agregado MMU



(fonte: própria do autor)

A Figura 16 representa as quatro composições granulométricas em um mesmo gráfico, o facilitando o entendimento das conclusões já citadas anteriormente.

Figura 16 - Composição granulométrica dos quatro agregados



(fonte: própria do autor)

## 5.2.4 Água

A água utilizada para a mistura dos aglomerantes é fornecida pelo órgão responsável da rede de abastecimento da cidade de Porto Alegre, o DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgoto.

## 5.3 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

Definidas as porcentagens de substituição e mistura de agregados a serem utilizadas, deu-se início à fase de produção das argamassas. Esta etapa compreende o cálculo da quantidade de materiais e o procedimento de mistura, a fim de padronizar as moldagens das quatro argamassas.

### 5.3.1 Quantidade de Material

A quantidade de material a ser misturada foi otimizada a fim de evitar desperdícios, no entanto, esta quantidade devia ser suficiente para realização de todos os ensaios do estado fresco e para a moldagem dos corpos de prova a serem ensaiados em estado endurecido, portando, foi adotado um total de aproximadamente 25 kg de mistura de materiais por argamassa.

A Tabela 12 apresenta os valores da massa unitária dos agregados, obtida conforme recomendações da NBR NM 45 (ABNT, 2006), e dos aglomerantes, que, por não estar definida em norma, foi obtida por meio do enchimento de um recipiente, de massa e volume conhecidos, com o material passando através de peneira com abertura de 0,6 mm, a fim de desfazer a possível compactação da amostra. Após o enchimento, o recipiente era rasado e pesado (Figura 17). Descontando desse valor a massa do recipiente vazio, obteve-se a massa de material, que, quando dividida pelo volume do recipiente, resulta na massa unitária do aglomerante.

Tabela 12 – Massa unitária dos componentes da argamassa

<b>Material</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>
Cimento CP II-F40	920
Cal-hidratada CH-III	640
Areia quartzosa	1500
Areia basáltica	1573
Água	1000

(fonte: própria do autor)

Figura 17 – Determinação da massa unitária dos aglomerantes



(fonte: própria do autor)

Embora o traço a ser estudado (1:1:6) seja em volume de materiais secos, para uma maior precisão, as argamassas foram dosadas em massa, ou seja, fez-se o uso da massa unitária para determinação da porcentagem de cada material na mistura. Esta conversão foi realizada de acordo com a Equação 1, adotando como valor fixo a massa unitária do cimento.

Equação 1 – Dosagem de material da mistura em massa

$$Massa_{material} = \frac{Volume_{do\ material}}{\frac{Massa\ unitária_{do\ cimento} \left(\frac{kg}{m^3}\right)}{1000}} \times \frac{Massa\ unitária_{do\ material} \left(\frac{kg}{m^3}\right)}{1000}$$

(fonte: própria do autor)

Uma vez feita a dosagem dos materiais (Equação 1) por meio da utilização de suas massas unitárias, ao fazer-se o caminho inverso (Equação 2), mas agora utilizando a massa unitária da mistura dos agregados, pode-se verificar que a argamassa MMU apresentou traço em volume de 1:1:5,7, em volume, para cimento, cal hidratada e agregado, respectivamente, o que faz com que essa argamassa tenha 5% a mais de pasta que as demais. Esse fato se deve ao aumento da massa unitária gerado pela mistura dos dois agregados. O mesmo ocorre na argamassa MTF, no entanto, devido a pequena quantidade de agregado basáltico (e pequena alteração na massa unitária), sua dosagem em volume não apresentou alteração.

Equação 2 – Determinação do volume de material na mistura

$$Volume_{material} = \frac{Massa_{do\ material}}{\frac{Massa\ unitária_{mistura\ de\ agregado} \left(\frac{kg}{m^3}\right)}{1000}} \times \frac{Massa\ unitária_{cimento} \left(\frac{kg}{m^3}\right)}{1}$$

(fonte: própria do autor)

Seguindo o processo descrito, calculou-se o traço em massa (Tabela 13) e, com este, definiu-se a massa dos materiais para mistura de cada argamassa (Tabela 14). Cabe aqui ressaltar que a massa de água para cada traço foi determinada com o fim de se atingir a consistência desejada da argamassa.

Tabela 13 – Traço das argamassas em massa

Material	Argamassa			
	REF	MTF	MMU	BAS
Cimento CII-F40 (kg)	1,00	1,00	1,00	1,00
Cal-hidratada CH-III (kg)	0,69	0,69	0,69	0,69
Areia quartzosa (kg)	9,78	8,06	5,87	-
Areia basáltica (kg)	-	1,82	4,10	10,26

(fonte: própria do autor)

Tabela 14 – Massa de material utilizada para mistura das argamassas

Dosagem das argamassas				
Material	Argamassa			
	REF	MTF	MMU	BAS
Cimento CII-F40 (kg)	2,5	2,2	2,2	2,2
Cal-hidratada CH-III (kg)	1,7	1,5	1,5	1,5
Areia quartzosa (kg)	24,5	17,7	12,9	-
Areia basáltica (kg)	-	4,0	9,0	22,6
Água (kg)	5,04	4,56	4,75	4,56
a/c	2,02	2,07	2,16	2,07
a/aglomerante	1,20	1,23	1,27	1,23
a/componentes anidros	0,18	0,18	0,19	0,17

(fonte: própria do autor)

### 5.3.2 Mistura

A mistura entre os aglomerantes, agregados e a água para dar origem a argamassa se deu com o auxílio de misturador mecânico de eixo vertical com capacidade suficiente para todos insumos dosados. No Quadro 1 são apresentados os tempos de mistura e o procedimento realizado em cada período. Cabe ressaltar que, caso a consistência desejada não fosse atingida ao final do período, era feita nova adição de água e a argamassa era misturada apenas o tempo suficiente para se tornar homogênea.

Quadro 1 – Procedimento de mistura dos materiais

Processo de mistura	
Tempo (s)	Procedimento
30	Mistura dos materiais a seco
90	Mistura dos materiais adicionando água
60	Mistura manual (raspagem do fundo do recipiente e homogeneização de possíveis grumos)
120	Mistura dos materiais adicionando água
30	Repouso antes de avaliar a consistência
-	Ensaio de consistência
10	Mistura antes de realizar o restante dos ensaios (após atingir a consistência)

(fonte: própria do autor)



## 5.4 ENSAIOS

Os ensaios praticados em laboratório tiveram por objetivo atestar a viabilidade de substituição da areia quartzosa por areia proveniente de rocha basáltica. Os ensaios descritos a seguir foram realizados em estado fresco e endurecido, alguns deles com auxílio de equipamento de carga da marca Emic, com capacidade de carga de até 200 KN, para os quatro teores de mistura de agregado no traço de argamassa estudado.

### 5.4.1 Estado Fresco

Com a argamassa pronta, ainda no estado fresco, foram feitos os ensaios de caracterização descritos abaixo:

#### 5.4.1.1 Consistência

O ensaio de índice de consistência foi realizado conforme recomendação da NBR 13.276 (ABNT, 2005). Este ensaio teve seu valor fixado como parâmetro inicial para o restante dos ensaios, no intervalo de  $260 \pm 10$  mm, sendo a água dosada para tal, conforme indica a Figura 18.

Figura 18 – Ensaio de índice de consistência



(fonte: própria do autor)

#### 5.4.1.2 Retenção de água

Com o índice de consistência fixo, a quantidade de água empregada na preparação da argamassa variou. A determinação da retenção de água da argamassa foi feita de acordo com o indicado na NBR 13.277 (ABNT, 2005), consistindo na medida da massa de água retida pela argamassa após a sucção realizada por meio de uma bomba de vácuo a baixa pressão em um funil de filtragem (Figura 19).

Figura 19 –Ensaio de retenção de água



(fonte: própria do autor)

#### 5.4.1.3 Densidade de massa no estado fresco

Quanto mais leve for a argamassa, mais trabalhável esta será, facilitando sua utilização (CARASEK, 2007). Devido a diferente massa específica e porcentagem de agregado utilizado nas quatro argamassas, a densidade de massa da argamassa também é diferente. Esta propriedade foi determinada por meio de ensaio descrito na NBR 13.278 (ABNT, 2005).

#### 5.4.1.4 Ar incorporado

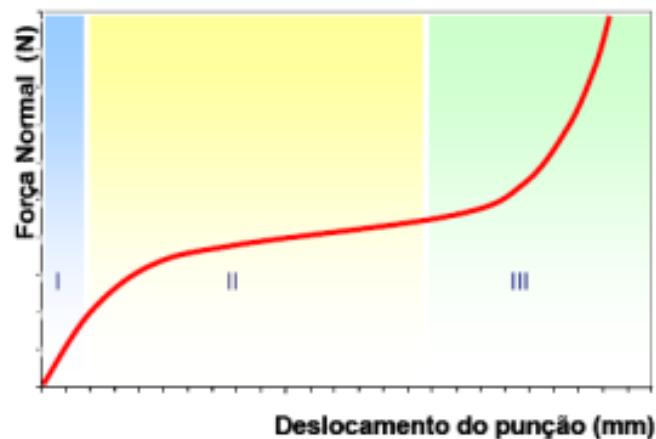
O teor de ar incorporado tem influência sobre a mistura tanto em estado fresco quando em estado endurecido. O procedimento seguido foi o da NBR 13.278 (ABNT, 2005), que descreve como deve ser realizado o cálculo para determinação deste, utilizando-se o resultado da densidade de massa no estado fresco e a dosagem dos materiais.

#### 5.4.1.5 Squeeze-Flow

A avaliação das características reológicas da argamassa foi dada pelo método squeeze-flow (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), descrito pela NBR 15.839 (ABNT, 2010). Este ensaio teve por objetivo avaliar a trabalhabilidade da argamassa por meio do esforço necessário para a compressão uniaxial de uma amostra cilíndrica do material entre duas placas paralelas.

Este ensaio tem seus resultados apresentados por meio de um gráfico de carga (N) versus o deslocamento (mm) (Figura 20), apresentando 3 estágios distintos. No estágio I tem-se um pequeno deslocamento e deformação plástica do material. No estágio II tem-se a deformação plástica ou fluxo viscoso da amostra e, no estágio III, observa-se um grande deslocamento e enrijecimento por deformação, caracterizado pela aproximação dos agregados e atrito formado pelos mesmos (CARDOSO *et al.*, 2005).

Figura 20 - Perfil típico de carga vs deslocamento do squeeze-flow



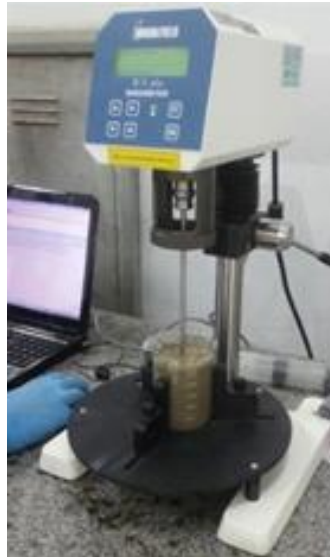
(fonte: CARDOSO *et al.*, 2005)

#### 5.4.1.6 Reometria Rotacional

A reometria consiste em técnicas que visam medir as propriedades reológicas dos fluidos (STOLZ, 2015), e consiste da utilização de um reômetro rotacional para avaliar as propriedades reológicas de fluidos, suspensões, argamassas e concretos (CARDOSO, 2009). Ao impor-se a argamassa velocidades angulares de cisalhamento controladas (taxas de cisalhamento), obtém-se como retorno a resistência do material ao cisalhamento (tensão de cisalhamento), e a viscosidade aparente da argamassa (tensão de cisalhamento dividida pela taxa de cisalhamento).

A caracterização reológica foi feita por meio de Reômetro rotacional Brookfield R/S Plus, modelo 4SST 115LS (Figura 21). Para a realização dos ensaios utilizou-se palheta tipo Vane de 20 mm de altura e 10 mm de diâmetro (V20X10) e béquer de 250 ml.

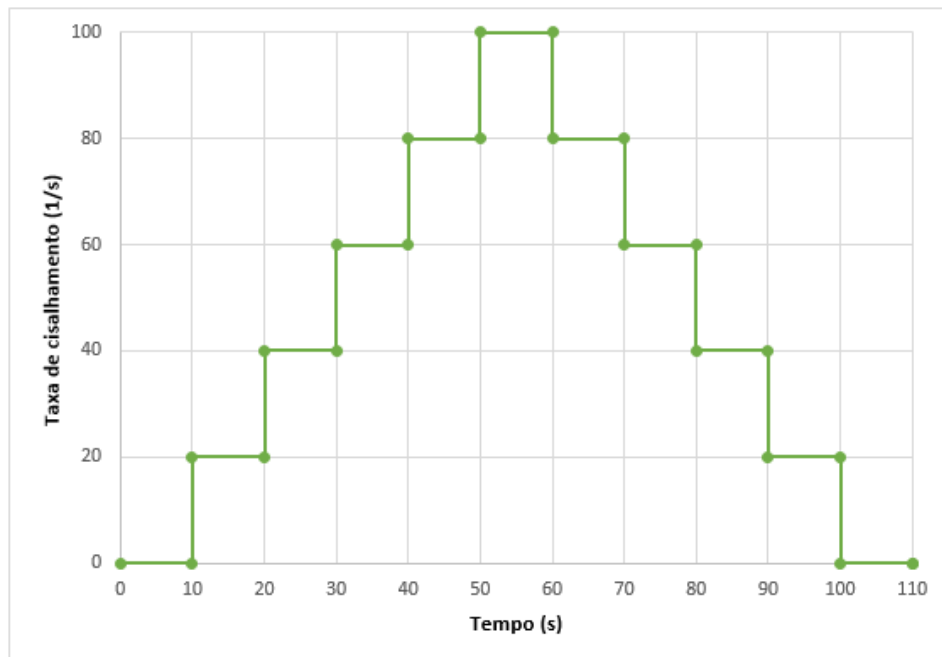
Figura 21 – Reômetro rotacional



(fonte: própria do autor)

Após as medidas realizadas no reômetro, os dados foram tratados com o software Rheo3000. A rotina de ensaio para análise das argamassas foi a mesma que utilizada por Giordani (2017) e consistiu em um total de onze patamares de leitura (seis de aceleração e cinco de desaceleração da palheta na argamassa), sendo uma a cada 10 segundos, atingindo a taxa de cisalhamento máxima de 100 1/s, conforme apresentado na Figura 22. Cabe ressaltar que os resultados obtidos deste ensaio são comparativos entre as argamassas.

Figura 22 – Rotina de ensaio no reômetro rotacional



(fonte: própria do autor)

### 5.4.2 Estado Endurecido

No estado endurecido foram realizados ensaios a fim de caracterizar a argamassa quanto à resistência à tração na flexão, resistência à compressão axial, módulo de elasticidade dinâmico, absorção de água por capilaridade, densidade de massa aparente e retração. Para o traço de argamassa em estudo, foram moldados corpos de prova em quantidade maior ou igual ao mínimo recomendado pela norma de cada ensaio. A seguir estão descritos os ensaios realizados para cada um dos teores de mistura dos agregados miúdos e que foram ensaiados aos 28 dias.

#### 5.4.2.1 Resistência à tração na flexão

Para o ensaio de resistência à tração na flexão foram seguidas as recomendações da NBR 13.279 (ABNT, 2005), a qual solicita a moldagem de, no mínimo, três corpos-de-prova prismáticos de (40x40x160) mm, por idade a ser ensaiada, com argamassa recém preparada. Este ensaio está representado na Figura 23.

Figura 23 – Corpo de prova posicionado para ensaio de tração na flexão



(fonte: própria do autor)

#### 5.4.2.2 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial segue as mesmas recomendações do ensaio anterior quanto à moldagem, visto que os corpos de prova são os mesmos. A NBR 13.279 (ABNT, 2005) recomenda que as duas metades do corpo-de-prova restantes do ensaio de tração na flexão sejam utilizadas para determinação da compressão axial, conforme representado na Figura 24.

Figura 24 – Metade do corpo de prova submetido ao ensaio de resistência à tração na flexão, posicionado para o ensaio de compressão axial



(fonte: própria do autor)

#### 5.4.2.3 Módulo de elasticidade dinâmico

A NBR 15.630 (ABNT, 2008) prevê um método de ensaio não destrutivo para determinação do módulo de elasticidade dinâmico em argamassas. O processo de ensaio, apresentado na Figura 25, consistiu na aplicação de gel nos receptores do aparelho de medição (Ultrassom), que são encostados nas extremidades do corpo de prova acomodado em um gabarito, fazendo com que a leitura seja sempre na parte central do corpo de prova. Essa leitura fornece o tempo de propagação da onda ultrassônica e, conseqüentemente, sua velocidade.

Figura 25 – Leitura do tempo de propagação de onda ultrassônica para determinação do módulo de elasticidade dinâmico



(fonte: própria do autor)

#### 5.4.2.4 Densidade de massa

A NBR 13.280 (ABNT, 2005) prescreve o método para determinação de densidade de massa aparente de argamassas para assentamento e revestimento no estado endurecido. Passados os 28 dias da moldagem, os corpos de prova foram medidos e pesados, possibilitando assim o cálculo da densidade de massa aparente ( $\text{kg/m}^3$ ) pela razão entre a massa do corpo de prova e seu volume. Os corpos de prova deste ensaio foram os mesmos que os utilizados no ensaio de módulo de elasticidade dinâmico e resistências à compressão e à tração.



#### 5.4.2.5 Absorção de água por capilaridade

O procedimento para determinação da absorção de água por capilaridade foi baseado na NBR 15.259 (ABNT, 2005). Foram moldados 6 corpos de prova com destinação para tal ensaio, atendendo as recomendações desta norma, que indica um mínimo de três. As amostras foram confeccionadas em molde metálico revestido com papel filme, ao invés do desmoldante comumente utilizado, a fim de evitar qualquer interferência posterior no resultado do ensaio.

Cabe salientar que, assim como Dal Bello (2017), neste ensaio fez-se uma adaptação da norma ao impermeabilizar-se as laterais dos corpos de prova até próximo à face superior, exceto os 5 mm que ficam em contato com a água, conforme Figura 26, com a finalidade de evitar a perda de água por evaporação durante o ensaio. Os corpos de prova foram ensaiados aos 28 dias, tendo sua massa determinada aos 10 e 90 minutos após ter sido postos em contato com a água.

Figura 26 – Ensaio de absorção de água por capilaridade



(fonte: própria do autor)

#### 5.4.2.6 Retração

Uma vez aplicada sobre a base, a argamassa é impedida de retrair-se livremente por conta da aderência, gerando tensões de tração que podem levar ao aparecimento de fissuras, diminuindo a qualidade e a durabilidade da edificação (CARASEK, 2007). Esta retração foi avaliada de acordo com a NBR 15.261 (ABNT, 2005), por meio da moldagem de corpos de prova 25x25x285 mm e de acompanhamento de sua variação dimensional por meio do equipamento apresentado na Figura 27. Os corpos de prova foram retirados da forma 72 horas após a



moldagem, a fim de evitar quebras e, posteriormente, foram mantidos em câmara climatizada a temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e  $90\pm 5\%$  de umidade relativa durante 28 dias.

Figura 27 – Equipamento normatizado para ensaio de retração



(fonte: própria do autor)

### 5.4.3 Quadro resumo dos ensaios realizados

Os ensaios realizados no estado endurecido para as quatro composições de argamassa foram executados de acordo com suas respectivas normas, conforme compilado apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – Resumo dos ensaios realizados no estado endurecido e o número de corpos de prova moldados por agregado

Ensaio no estado endurecido	Cps (mm)	Número de Cps	Norma
Tração na flexão	40x40x160	6	NBR 13279
Compressão axial	40x40x160	12	NBR 13279
Módulo de elasticidade dinâmico	40x40x160	6	NBR 15630
Absorção de água por capilaridade	40x40x160	6	NBR 15259
Densidade de massa	40x40x160	6	NBR 13280
Retração	25x25x285	4	NBR 15261

(fonte: próprio do autor)

## 6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios propostos no capítulo anterior. Os resultados a seguir apresentam as informações referentes aos quatro traços de argamassa ensaiados. Embora os resultados sejam apresentados separadamente, no final do capítulo, as Figura 41 e Figura 42 apresentam uma compilação dos valores obtidos, a fim de facilitar o entendimento.

### 6.1 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Os ensaios realizados no estado fresco foram os de consistência, retenção de água, ar incorporado, densidade de massa, squeeze-flow e reologia. Neste item são apresentados os resultados obtidos.

#### 6.1.1 Índice de consistência

Visto valores médios utilizados em ensaios com argamassas mistas de revestimento de outros autores, adotou-se um índice de consistência fixo de  $260 \pm 10$  mm, dosando a água de acordo com a necessidade do traço, em função da alteração dos agregados. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 15, no entanto, estes representam médias de três valores de apenas um ensaio por argamassa conforme preconiza a NBR 13.276 (ABNT, 2005) e, por este motivo, não requerem avaliação, servindo apenas como parâmetro para início dos ensaios.

Tabela 15 – Índice de consistência médio das argamassas

Identificação Média		a/c
Argmassa REF	259 mm	2,02
Argmassa MTF	258 mm	2,07
Argmassa MMU	260 mm	2,16
Argmassa BAS	263 mm	2,07

(fonte: própria do autor)

### 6.1.2 Retenção de água

Carasek (2007) afirma que a retenção de água é uma propriedade muito importante, visto ser esta a responsável pela regulação da perda de água de amassamento durante o processo de secagem. Esta mesma autora afirma ainda que a trabalhabilidade é fortemente influenciada pela capacidade da argamassa de reter água, o que, por consequência, influencia na produtividade de quem a utiliza.

A grande responsável por reter água na argamassa é a cal (CINCOTTO *et al.*, 2007), no entanto, a quantidade de cal foi a mesma em todas as argamassas testadas, sendo assim, tem-se como variante apenas o agregado e a água adicionada à mistura. Para determinação da porcentagem de água retida na argamassa é necessário conhecer a relação água/componentes anidros da mistura, valores apresentados na Tabela 14.

Por meio das recomendações normativas, obteve-se a porcentagem de retenção de água das argamassas, as quais estão apresentados na Tabela 16. Os valores encontrados são elevados (o que é um fator positivo), e estão coerentes com o trabalho de Silva (2003), que obteve resultados de retenção de água acima de 90%. De acordo com a NBR 13.281 (ABNT, 2005), para os valores apresentados de retenção de água, as quatro argamassas são classificadas como U6.

Tabela 16 – Retenção de água das argamassas em estudo

	REF	MTF	MMU	BAS	Classificação NBR 13281
Ra (%)	99,2	97,9	97,7	96,7	<b>U6</b>

(fonte: própria do autor)

Os valores apresentados são bem semelhantes entre as argamassas, Tristão (2003) justifica este fato afirmando que o método proposto pela NBR 13.277 (ABNT, 2005) não tem a sensibilidade necessária para captar pequenas diferenças de retenção de água ou então que a granulometria do agregado não tem influência sobre este valor visto que o aumento da retenção de água se dá com o aumento da proporção de aglomerante das argamassas. Mattos (2001) auxilia no entendimento desta pequena variação, pois concluiu em seu trabalho que apenas o traço exerce influência significativa nesta propriedade, não o agregado.

### 6.1.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A Tabela 17 e Figura 28 apresentam os valores de densidade de massa das argamassas no estado fresco. Cabe ressaltar que os tempos de execução dos ensaios (10 e 60 minutos após alcance da consistência almejada), foram adotados com base na NBR 15.839 (ABNT, 2010), a qual recomenda que os ensaios em questão, assim como o ensaio de squeeze-flow, devem ser executados novamente quando se tem interesse em avaliar o comportamento reológico da argamassa ao longo do tempo.

Tabela 17 – Densidade de massa no estado fresco

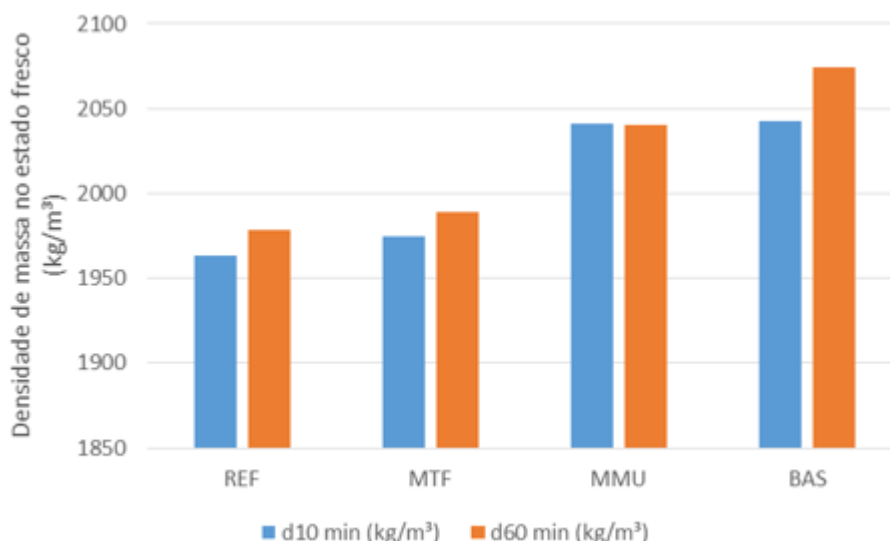
	REF	MTF	MMU	BAS	Classificação NBR 13281
d <sub>10 min</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1963,1	1974,7	2041,3	2042,9	D5
d <sub>60 min</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1978,3	1989,0	2040,3	2074,3	D5
Variação (%)	0,77	0,73	-0,05	1,54	
dt (g/cm <sup>3</sup> )	2,083	2,092	2,101	2,179	

d – densidade medida

dt – densidade de massa teórica

(fonte: própria do autor)

Figura 28 – Representação gráfica da densidade de massa no estado fresco para os diferentes tipos de argamassa



(fonte: própria do autor)

Como era de se esperar, a massa das argamassas aumentou juntamente com o aumento da porcentagem de agregado basáltico na mistura, visto a maior massa específica e unitária deste

material. Houve também um aumento de massa das argamassas com o passar do tempo, fato este justificado pela diminuição do teor de vazios, conforme comprovado na Tabela 18.

A exceção a este comportamento é a argamassa MMU, a qual apresentou pequena variação de densidade de massa no estado fresco, o que pode ser justificado devido ao seu melhor empacotamento. Ainda que tenham sua densidade de massa alterada com o passar do tempo, todas estas argamassas se encaixam na classificação D5 da NBR 13.281 (ABNT, 2005), que abrange argamassas com densidade variando de 1.800 a 2.200 kg/m<sup>3</sup>. Para Carasek (2007), estas argamassas são classificadas como argamassas normais, ou seja, nem leves, nem pesadas. Os valores de densidade de massa encontrados por Angelim *et al.* (2003) para argamassa com mesmo proporcionalmente de materiais foi de 1.970 kg/m<sup>3</sup>, bem próximo aos valores apresentados na Tabela 17, o que caracteriza sua viabilidade de utilização quanto a este parâmetro.

Para determinação do teor de vazios conforme recomendações da NBR 13.278 (ABNT, 2005), fez-se necessário o cálculo da densidade de massa teórica sem vazios (dt), apresentado na Tabela 17. É possível observar a coerência desses resultados com os obtidos no ensaio de densidade de massa, visto o aumento da massa conforme o acréscimo da proporção de basalto na mistura.

Visto que se adotou quantidades praticamente iguais de aglomerantes e água, tem-se como responsável pela variação do teor de ar incorporado a composição granulométrica do agregado. Os teores de ar incorporado apresentados na Tabela 18 e representados na Figura 29 estão diretamente ligados às curvas da distribuição granulométrica dos agregados apresentadas no capítulo anterior.

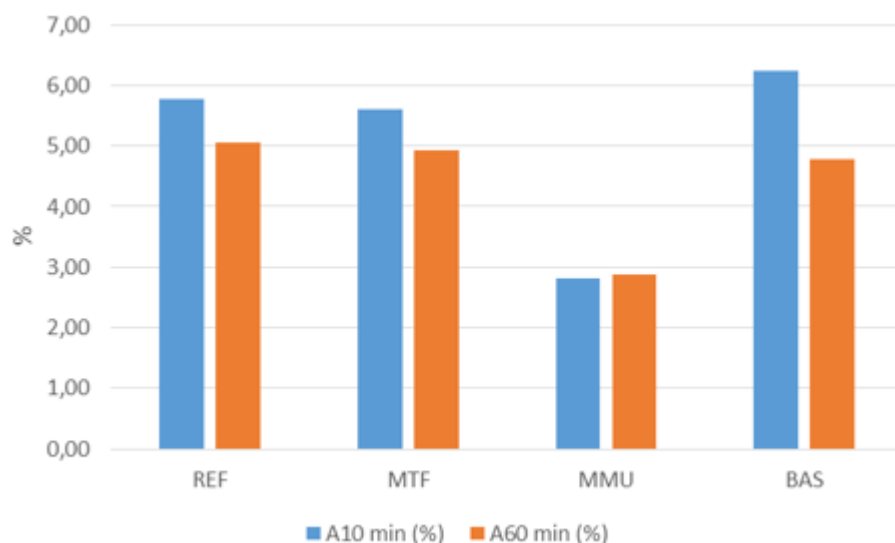
Tabela 18 – Teor de ar incorporado

	REF	MTF	MMU	BAS
A10 min (%)	5,77	5,61	2,82	6,23
A60 min (%)	5,05	4,93	2,87	4,79
Variação (%)	-0,14	-0,14	0,02	-0,30

A – Ar incorporado calculado

(fonte: própria do autor)

Figura 29 – Representação gráfica do teor de ar incorporado para os diferentes tipos de argamassa



(fonte: própria do autor)

O baixo teor de ar incorporado da argamassa MMU, quando comparado ao restante das argamassas, e a pequena variação de massa ao longo do tempo, se justificam pelo menor número de vazios da composição granulométrica do agregado empregado nesta mistura. Mehta e Monteiro (1994) corroboram com este fato afirmando que o teor de ar incorporado é diretamente influenciado pelo empacotamento das partículas do agregado, de forma que, quando maior o empacotamento, menor será o teor de ar incorporado.

Na Tabela 19 pode-se observar que a variação de ar incorporado ao longo do tempo é inversamente proporcional à variação da densidade de massa, evidenciando a relação existente entre os dois parâmetros, ou seja, quanto maior o teor de ar incorporado maior também é a variação da massa da argamassa com o passar do tempo

Tabela 19 – Tabela comparativa entre densidade de massa e ar incorporado

	REF	MTF	MMU	BAS
d10 min (kg/m <sup>3</sup> )	1963,1	1974,7	2041,3	2042,9
d60 min (kg/m <sup>3</sup> )	1978,3	1989,0	2040,3	2074,3
A10 min (%)	5,77	5,61	2,82	6,23
A60 min (%)	5,05	4,93	2,87	4,79

d – densidade medida

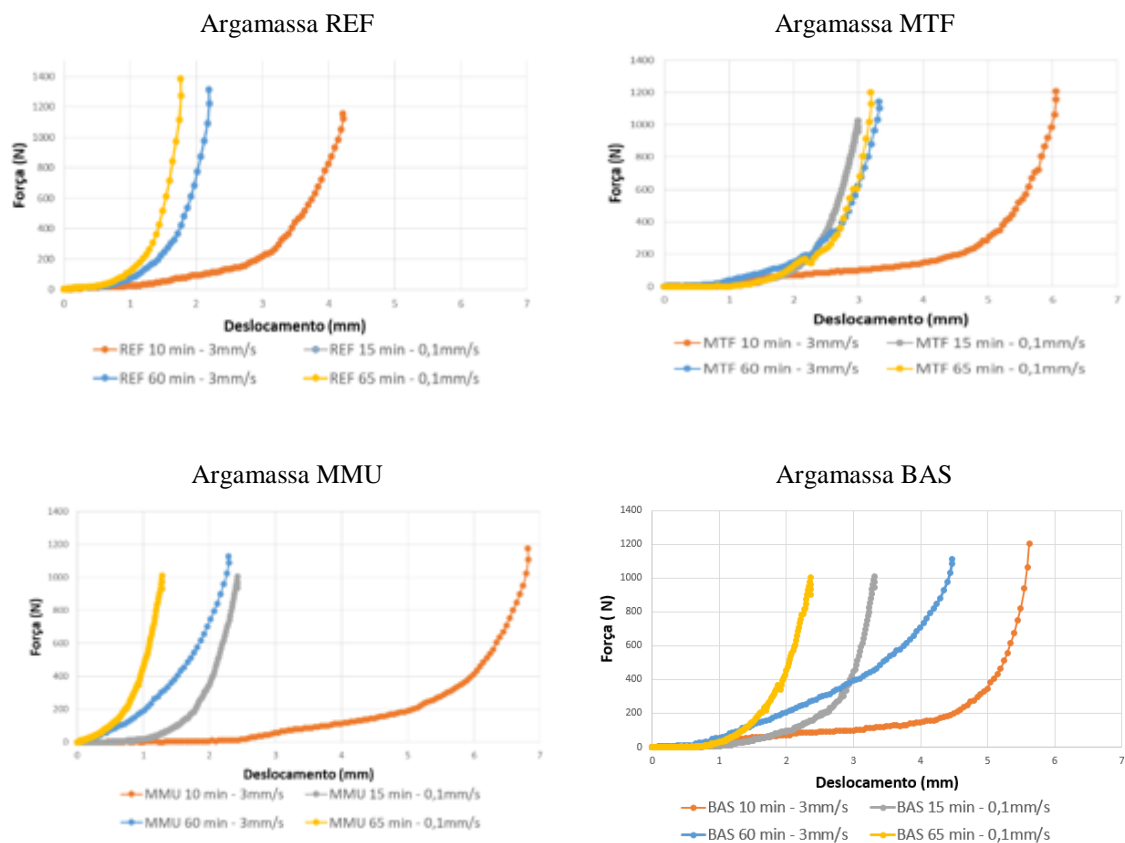
A – ar incorporado calculado

(fonte: própria do autor)

### 6.1.5 Squeeze-flow

A Figura 30, apresentada a seguir, mostra os resultados obtidos na caracterização reológica das argamassas por meio do ensaio de squeeze-flow, nos tempos de 10 e 60 minutos, para a velocidade de 3mm/s, e nos tempos de 15 e 65 minutos, para velocidade de 0,1 mm/s, conforme determinado pela NBR 15.839 (ABNT, 2010).

Figura 30 – Resultados do ensaio de squeeze flow realizados nas argamassas



(fonte: própria do autor)

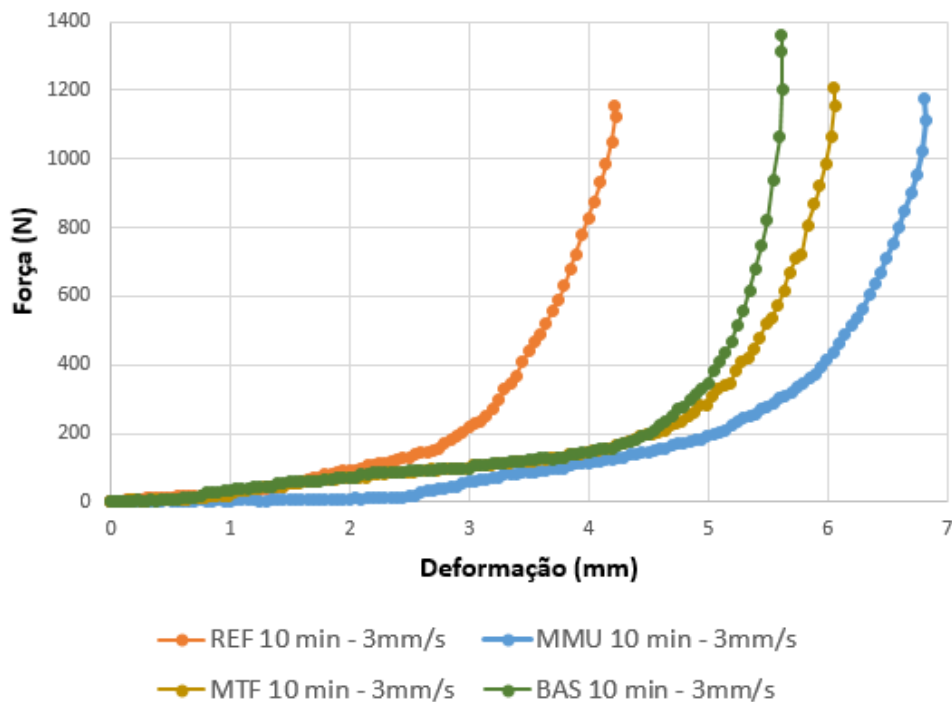
Os ensaios realizados com velocidade de 3mm/s geraram maiores deformações, independentemente da argamassa. Ao se ensaiar novamente as argamassas com essa velocidade, mas 60 minutos após a mistura, observa-se uma significativa diminuição do estágio plástico. Quando ensaiadas a 0,1mm/s, as argamassas apresentaram resultados bem semelhantes quanto à força, a exceção da argamassa REF, que resultou em uma força 400 N maior que as restantes.

A argamassa MTF, quando ensaiada aos 15 e aos 65 minutos, com velocidade de 0,1mm/s, praticamente não apresentou diferença de deformação, fato inesperado, visto o ocorrido no

restante das argamassas. Esse resultado indica que, para um período de 50 minutos entre os ensaios, essa argamassa manteve constante sua deformação, indicando que seria necessário um mesmo esforço para seu espalhamento em uma parede.

As menores deformações obtidas nos ensaios realizados na velocidade de 0,1mm/s podem estar relacionadas ao fato de que, a menor velocidade permite uma reorganização dos grãos, fazendo com que estes travem o fluxo, dificultando o deslocamento (DAL BELLO, 2017). O grande estágio plástico apresentando pela argamassa MMU é justificado por Cardoso (2009) através de verificação feita em argamassas compostas por agregados desuniformes, onde há uma tendência de melhora no empacotamento dos agregados, o que reduz a quantidade de vazios entre as partículas, fazendo com que menos pasta seja consumida para preencher estes vazios ou restando mais pasta para lubrificar os agregados, melhorando a fluidez.

Figura 31 – Comparação de resultados entre as quatro argamassas aos 10 minutos – 3mm/s



(fonte: própria do autor)

A Figura 31 representa os resultados obtidos para as quatro argamassas nos ensaios de 10 minutos com velocidade de 3mm/s. Em nenhuma das argamassas foi possível identificar o estágio I, onde deveria ocorrer um pequeno deslocamento com deformação plástica; o estágio II está bem caracterizado, sendo menor para a argamassa REF, a qual encontra-se nesse estágio até uma deformação aproximada de 3 mm, enquanto para o restante das argamassas este estágio



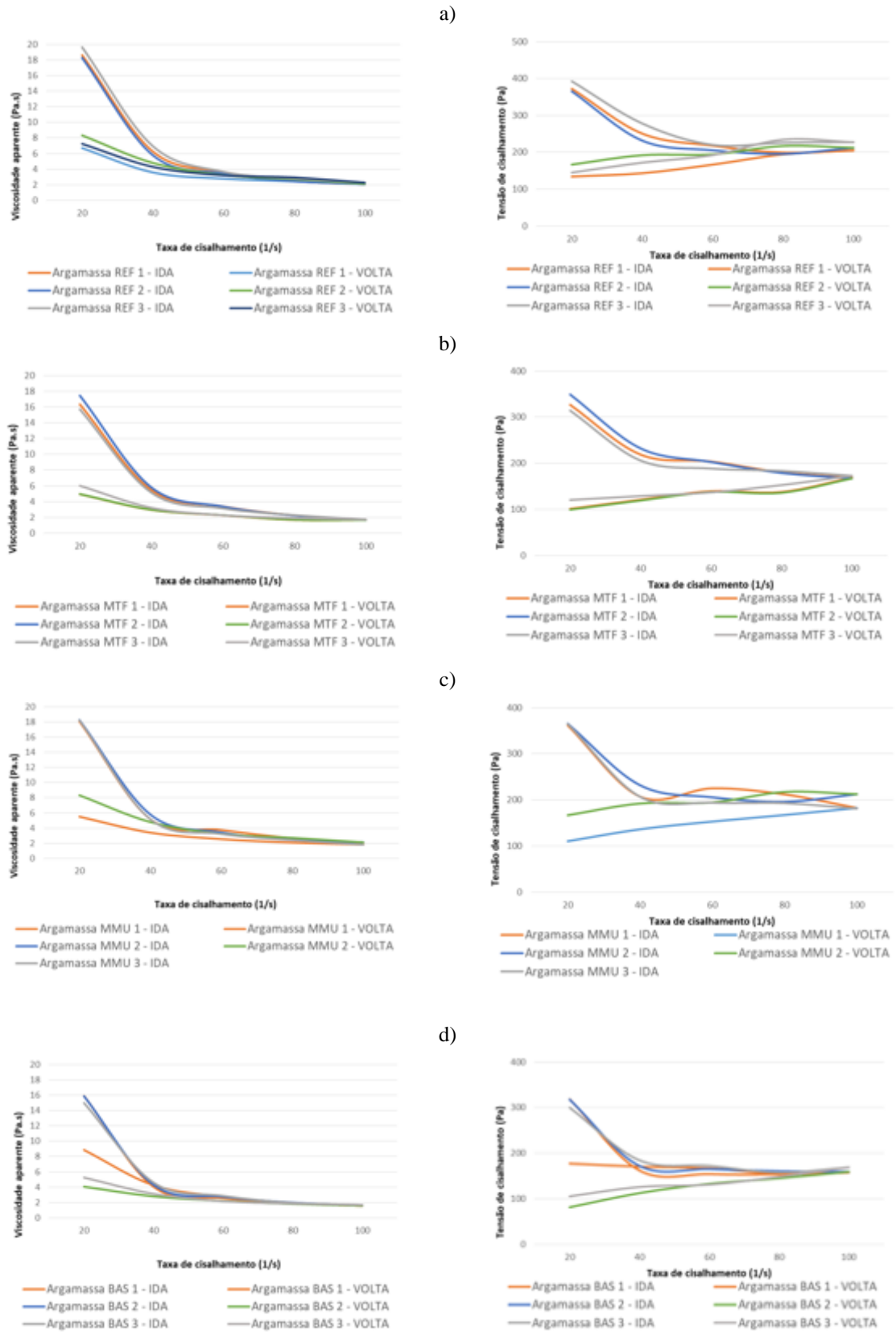
se mantem até uma deformação de 4,5 mm; o estágio III está bem evidenciado em todas argamassas, sendo este o estágio caracterizado pelo aumento da força aplicada e diminuição da variação de deslocamento.

Esperava-se que grãos mais angulosos gerassem maior travamento, no entanto foi a argamassa REF que apresentou maior resistência ao fluxo (deformação de 4,2 mm) quando comparada as argamassas com adição de basalto (deformação de 6,8 mm para argamassa MMU), o que leva a concluir que a resistência ao fluxo é diminuída conforme a granulometria do agregado se aproxima da zona ótima e torna-se mais bem graduada. Uma menor resistência ao fluxo significa que a argamassa apresenta menor resistência ao espalhamento na parede, o que facilita a execução e um menor desgaste em caso de uso de equipamento mecânico de projeção.

#### **6.1.6 Reometria rotacional**

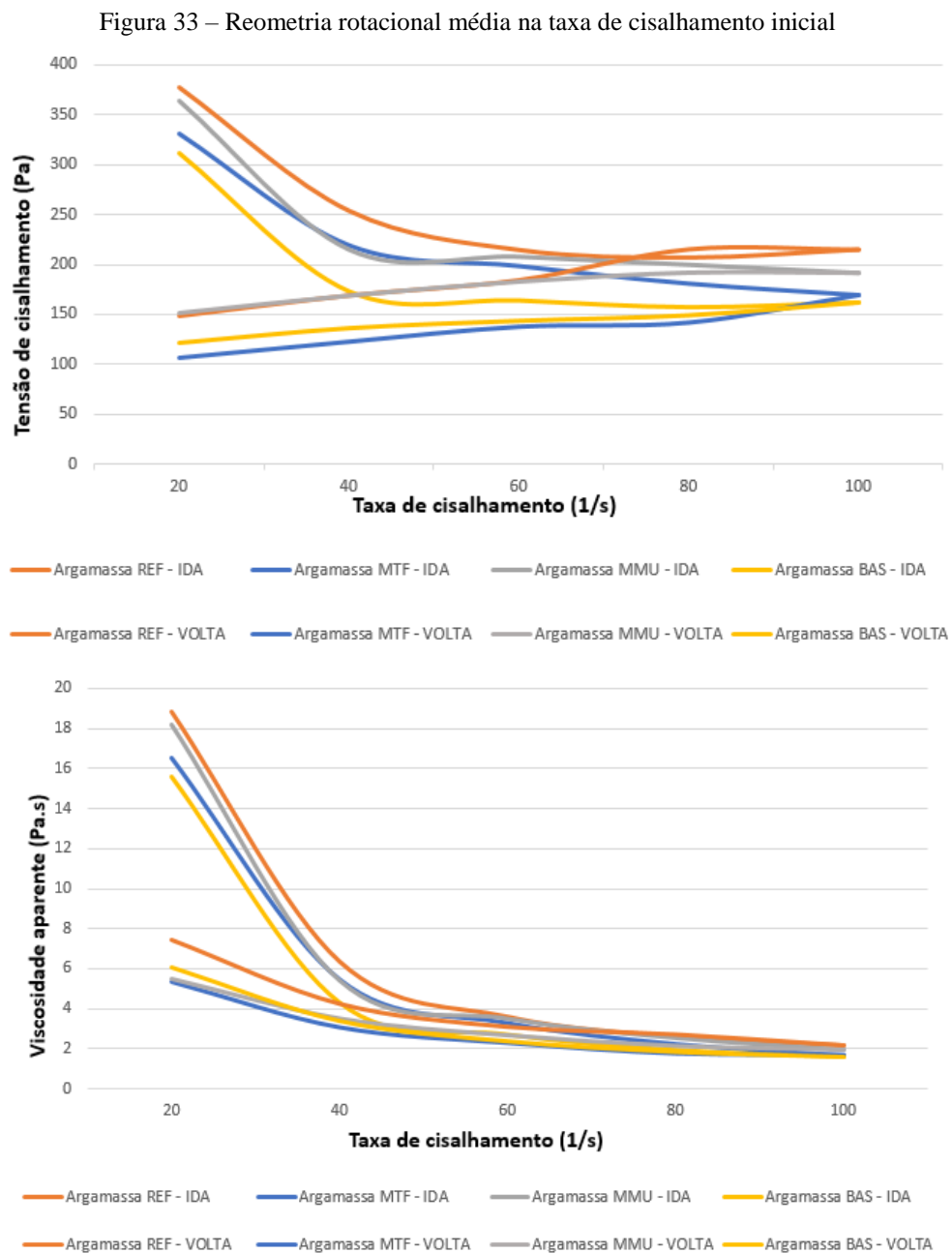
Foram realizadas três repetições do ensaio de reometria rotacional e os resultados obtidos para cada argamassa estão apresentados na Figura 32, a qual mostra gráficos de Viscosidade Aparente vs. Taxa de cisalhamento e Tensão de cisalhamento vs. Taxa de cisalhamento, respectivamente, para a argamassa REF (a), argamassa MTF (b), argamassa MMU (c) e argamassa BAS (d). Os valores utilizados para gerar estes gráficos estão apresentados no Apêndice A.

Figura 32 – Resultados do ensaio de reometria rotacional



(fonte: própria do autor)

Visto a semelhança de comportamento dos três ensaios realizados em cada argamassa, fez-se uma média dos valores das curvas de ida e volta e reuniu-se os resultados em dois gráficos (tensão de cisalhamento vs. taxa de cisalhamento e viscosidade aparente vs. taxa de cisalhamento, respectivamente) apresentados na Figura 33, facilitando assim a análise dos dados.



(fonte: própria do autor)

A execução do ensaio se dá por meio do giro da palheta imersa na argamassa, este giro gera acúmulo de água no entorno da palheta, fato que influencia nos valores viscosidade e tensão de

cisalhamento obtidos (CARDOSO, 2009), portanto, foi utilizado como base para análise dos resultados os valores obtidos com taxa de cisalhamento de 20 1/s.

A Tabela 20 apresenta os valores médios de tensão de cisalhamento e viscosidade aparente para as argamassas, bem como seu valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação. Devido à proximidade dos resultados, fez-se a análise de comparação de médias por Fisher, concluindo que, tanto na tensão de cisalhamento quanto na viscosidade aparente, a argamassa REF apresenta valores considerados estatisticamente iguais a argamassa MMU, ao passo que este fato também ocorre entre as argamassas MTF e BAS.

Tabela 20 – Valores médios de taxa de cisalhamento e viscosidade aparente para os diferentes tipos de argamassa

Ensaio	Tempo (s)	Taxa de cisalhamento (1/s)	Argamassa REF	Argamassa MTF	Argamassa MMU	Argamassa BAS
Tensão de cisalhamento (Pa)	20	20	372,71	327,05	361,82	318,42
			365,67	349,3	365,67	317,78
			392,92	314,49	364,84	300,05
	Média		377,10	330,28	364,11	312,08
	Desvio padrão		14,15	17,63	2,03	10,43
	Coeficiente de variação		4%	5%	1%	3%
Viscosidade aparente (Pa.s)	20	20	18,63	16,35	18,09	15,92
			18,28	17,46	18,28	15,89
			19,64	15,72	18,24	15
	Média		18,85	16,51	18,20	15,60
	Desvio padrão		0,71	0,88	0,10	0,52
	Coeficiente de variação		4%	5%	1%	3%

(fonte: própria do autor)

Embora todas as argamassas tenham sido moldadas com o mesmo traço e possuam índice de consistência semelhantes, os maiores valores de tensão de cisalhamento e de viscosidade são apresentados pela argamassa REF (o que é coerente com o ensaio de squeeze flow, já que essa deformou menos) e, em contraponto a isso, os menores valores são apresentados pela argamassa BAS, o que pode indicar influência do agregado nestes valores. Em estudo sobre cales em argamassas mistas, Giordani (2017) identificou diferenças nesses parâmetros medindo argamassas com granulometrias distintas com traços iguais em massa.

Stolz (2015) afirma que o pacote granulométrico total (ligante + agregados) tem significativa influência nas propriedades reológicas das argamassas, justificando assim a grande semelhança entre os valores apresentados independentemente da curva granulométrica dos agregados, visto que todas as argamassas foram moldadas com traço 1:1:6. Westerholm *et al.* (2008) afirmam que o agregado influencia fortemente na viscosidade das argamassas, no entanto, o efeito negativo da viscosidade em argamassas com agregado mal graduado pode ser atenuado pelo aumento do volume de pasta na mistura.

Maiores valores de viscosidade significam maiores dificuldade de manuseio da argamassa na sua aplicação, gerando aumento de resistência ao espalhamento e diminuição da aderência desta ao substrato (RECENA, 2012). Porém, a ordem de grandeza e os valores obtidos para as argamassas com substituição são considerados semelhantes aos da argamassa de referência, assim como o que foi obtido no índice de consistência.

A Tabela 21 apresenta, resumidamente, os valores obtidos dos ensaios realizados no estado fresco, e tem por objetivo facilitar o entendimento do comportamento das argamassas de acordo com a variação proposta no agregado.

Tabela 21 – Resumo dos resultados obtidos no estado fresco

Argamassa	Consistência (cm)	Retenção de água (%)	Ar incorporado 10 min (%)	Densidade de massa 10 min (kg/m³)	Squeeze flow (10 min - 3mm/s)		Viscosidade aparente máxima (Pa.s)	Tensão de cisalhamento (Pa)
					Força (N)	Deslocamento (mm)		
REF	259	99,19	5,77	1963,09	1156,00	4,21	18,85	377,10
MTF	258	97,89	5,61	1974,67	1208,60	6,05	16,51	330,28
MMU	260	97,69	2,82	2041,33	1175,70	6,81	18,20	364,11
BAS	263	96,69	6,23	2042,87	1359,60	5,61	15,60	312,08

(fonte: própria do autor)

## 6.2 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Neste item são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido, consistindo no módulo de elasticidade dinâmico, densidade de massa, tração na flexão, compressão axial, absorção de água por capilaridade e retração. Assim como já citado, estes ensaios foram executados aos 28 dias e os corpos de prova foram mantidos em

câmara climatizada, com temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa do ar de  $90\pm 5\%$ , controladas. Foram também realizadas imagens das argamassas após sua ruptura.

Os dados foram avaliados com o auxílio do software Statística 8.0 através da Análise de Variância (ANOVA), o qual permitiu comparar as variáveis controláveis do trabalho, identificando se estas geraram efeitos significativos nos resultados, com intervalo de confiança de 95%. Todos os valores individuais obtidos para estes ensaios são apresentados no Apêndice B.

### 6.2.1 Módulo de elasticidade dinâmico

Traços com menor relação a/c tendem a gerar argamassas com menor porosidade (Tabela 24), logo, estas apresentam maior módulo de elasticidade (STOLZ, 2015); portanto, era de se esperar que a argamassa MMU apresentasse maior módulo de elasticidade, enquanto a argamassa REF deveria apresentar o menor valor perante as demais, conforme foi observado na Tabela 22.

Tabela 22 – Módulo de elasticidade dinâmico dos diferentes tipos de argamassa

Argamassa	Ed médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
Arg. REF	3664,36	46,77	1%
Arg MTF	3703,12	55,94	2%
Arg. MMU	4084,78	59,30	1%
Arg. BAS	3712,00	38,31	1%

(fonte: própria do autor)

A qualidade e a durabilidade de um revestimento de argamassa estão diretamente ligadas à sua capacidade de absorver deformações, sendo essa capacidade medida por meio do módulo de elasticidade. Quanto menor o módulo de elasticidade, maior a capacidade de deformação da argamassa, sendo mais eficaz no suporte às variações do substrato e em absorver as contrações e expansões quando da saída da água, devido à evaporação ou a sucção do substrato, sem fissurar (SILVA, 2011). Para este mesmo autor, existe uma relação expressiva do módulo de elasticidade dinâmica e as resistências à compressão e à tração na flexão, relação esta que pode facilmente ser identificada na Tabela 34, a qual apresenta o resumo dos resultados obtidos.

Os valores de módulo de elasticidade foram aplicados no software Statistica e avaliados conforme Análise de Variância. A Tabela 23 apresenta o resultado dessa análise e indica que existe influência da composição granulométrica no módulo de elasticidade dinâmico das argamassas.

Tabela 23 – ANOVA: módulo de elasticidade dinâmico

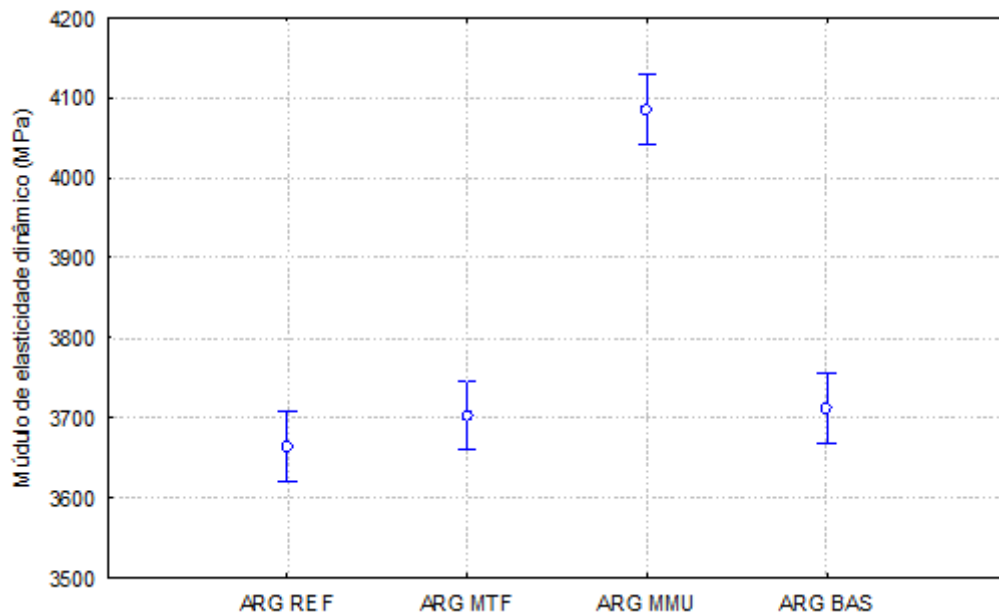
Efeito	Soma dos Quadrados	GL*	Médias quadraticas	Teste F	p-nível	Significância
Argamassa	697.871,45	3	232624	90,3	0,000000	Sim
Erro	51.504,72	20	2575	-	-	

\*GL – Graus de Liberdade

(fonte: própria do autor)

Pode-se concluir que a presença de agregado basáltico gera elevação deste índice; no entanto, a maior influência é dada pelo maior empacotamento. O módulo de elasticidade dinâmico apresentou (Figura 34) maior valor para argamassa MMU, a qual possui menor índice de vazios no estado fresco (Tabela 18) e maior densidade de massa aparente no estado endurecido (Tabela 24), ou seja, menor porosidade, e menor valor para a argamassa REF, que possuiu maior teor de ar incorporado aos 60 minutos. Em função do módulo de elasticidade obtido, pode-se afirmar que este não é um fator que impeça a utilização, já que todas as argamassas apresentam um valor relativamente baixo, se comparado a outros estudos feitos com o mesmo traço de argamassa, como os apresentados por Stolz (2015), que obteve valores médios de 7.500 MPa.

Figura 34 – Influência do agregado no módulo de elasticidade dinâmico



(fonte: própria do autor)

Fez-se uma análise de comparação de médias por Fisher, o que permitiu concluir que o módulo de elasticidade das argamassas REF, MTF e BAS são estatisticamente iguais entre si, tendo apenas a argamassa MMU valor estatisticamente diferente e maior.

### 6.2.2 Densidade de massa aparente no estado endurecido

Tabela 24 estão apresentados os valores médios de densidade de massa aparente no estado endurecido para as argamassas. Enquanto os ensaios de densidade de massa no estado fresco mostravam o aumento da densidade de acordo com o aumento da porcentagem de agregado basáltico na mistura, no estado endurecido a argamassa MMU apresentou maior densidade, mesmo tendo apenas 40% de agregado basáltico. Ainda que o agregado basáltico possua maior massa específica, o baixo teor de ar incorporado e o maior empacotamento gerado pela mistura dos agregados também proporcionaram à argamassa MMU a maior densidade. Para o restante das argamassas, sua densidade de massa no estado endurecido equivale aos valores encontrados no estado fresco (Tabela 17), e está diretamente ligada ao teor de ar incorporado aos 60 minutos (Tabela 18), onde o maior teor de ar incorporado gerou argamassas com menor densidade.



Tabela 24 – Densidade de massa aparente no estado endurecido

Argamassa	p médio (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio Padrão	CV (%)	Classificação NBR 13281
Arg. REF	1769,03	12,83	1%	M5
Arg. MTF	1796,81	10,82	1%	M5
Arg. MMU	1854,34	6,63	0%	M5
Arg. BAS	1844,17	15,95	1%	M5

(fonte: própria do autor)

De acordo com a classificação da NBR 13.281, todas as argamassas têm classificação M5 quanto à sua densidade de massa aparente no estado endurecido, classificação esta que compreende argamassas com densidade variando de 1.600 a 2.000 kg/m<sup>3</sup>. Os resultados obtidos por meio da Análise de Variância mostram que o agregado tem sim influência neste parâmetro, conforme apresentado na Tabela 25.

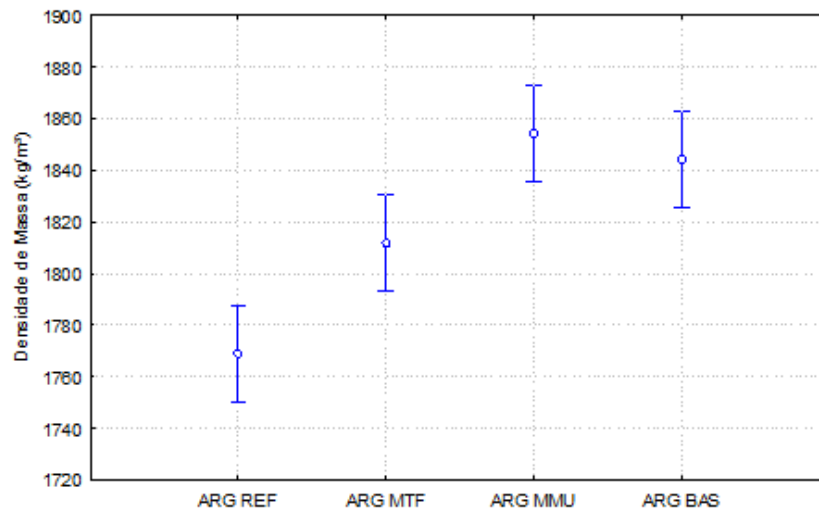
Tabela 25 – ANOVA: densidade de massa aparente no estado endurecido

Efeito	Soma dos Quadrados	GL	Médias quadraticas	Teste F	p-nível	Significância
interc	79.486.741,10	1	79486741	164358,2	0,000000	Sim
Argamassa	26.555,51	3	8852	18,3	0,000006	Sim
Erro	9.672,38	20	484	-	-	

(fonte: própria do autor)

A Figura 35 evidencia a diferença de densidade de massa propiciada pelo agregado da argamassa. Recena (2012) afirma que granulometrias mais continuas geram argamassas de maior densidade e, por consequência, maior resistência mecânica, o que corrobora com os valores obtidos, visto que a argamassa MMU apresenta toda sua composição granulométrica dentro da zona ótima proposta pela NBR 7.211 (ABNT, 2009a), e possui um menor índice de vazios.

Figura 35 – Influência do agregado na densidade de massa aparente no estado endurecido



(fonte: própria do autor)

A análise de comparação de médias por Fisher permitiu concluir que a densidade de massa da argamassa MMU é estatisticamente igual a argamassa BAS, sendo diferente das demais.

### 6.2.3 Resistência à tração na flexão

Visto não se tratarem de ensaios destrutivos, os corpos de prova utilizados para os ensaios de módulo de elasticidade dinâmico e densidade de massa aparente no estado endurecido foram os mesmos que posteriormente se utilizou para determinação da resistência à tração na flexão e compressão axial.

A Tabela 26 apresenta os resultados de resistência à tração na flexão das argamassas. É possível perceber que, independentemente do agregado utilizado, as argamassas apresentam comportamento bem semelhante, exceto a argamassa MMU, que, como já citado anteriormente, era esperado que tivesse maior resistência, visto o melhor empacotamento de seus agregados, e a maior densidade no estado endurecido e maior módulo de elasticidade dinâmico no estado endurecido das argamassas. Embora seja bastante significativa a diferença obtida da argamassa MMU para as restantes, na classificação da NBR 13.281 (ABNT, 2005), todas são consideradas R1, ou seja, possuem resistência à tração na flexão menor que 1,5 MPa.

Tabela 26 – Resistência à tração na flexão

Argamassa	Média (MPa)	Desvio Padrão (Mpa)	CV (%)	Classificação NBR 13281
Arg. REF	0,74	0,04	6	R1
Arg. MTF	0,65	0,12	18	R1
Arg. MMU	1,31	0,06	4	R1
Arg. BAS	0,72	0,10	14	R1

(fonte: própria do autor)

Em trabalho realizado com argamassa na mesma proporção aglomerante: agregado (1:3), Silva (2003) obteve valores de resistência a tração aos 28 dias de 0,6 MPa, o que é bem próximo aos valores das argamassas REF, MTF e BAS, guardadas pequenas diferenças quanto ao tipo de cimento e composição granulométrica. Tristão (1995) afirma que a correlação entre a resistência à tração e a relação água/cimento é bastante alta, porém, como as relações água/cimento das argamassas foram bem semelhante, é aceitável que as resistências à tração também sejam.

Os resultados de resistência a tração na flexão foram submetidos a Análise de Variância (Tabela 27), a qual permitiu concluir que o agregado tem influência nos resultados obtidos.

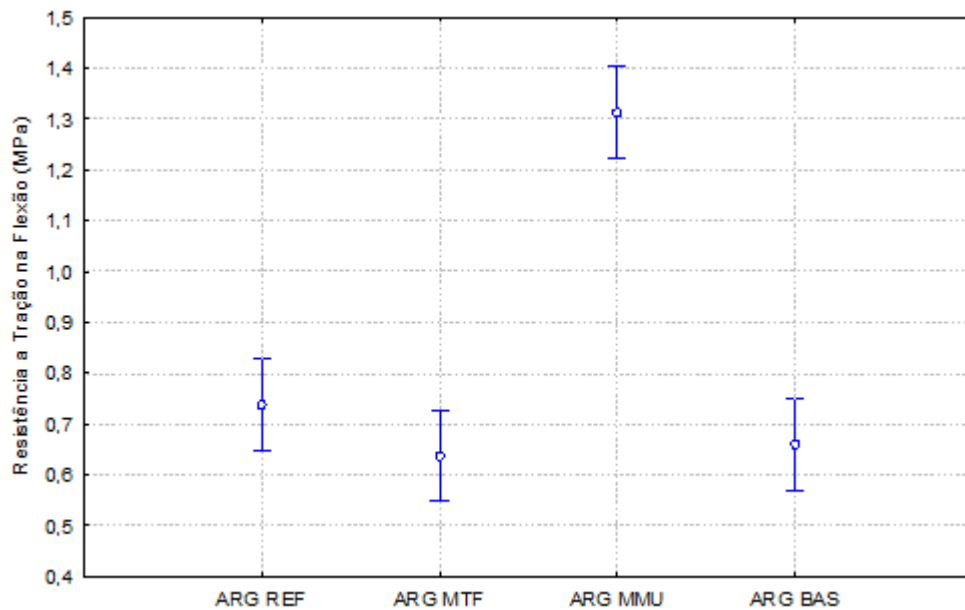
Tabela 27 – ANOVA: resistência à tração na flexão

Efeito	Soma dos Quadrados	GL	Médias quadraticas	Teste F	p-nível	Significância
interc	16,83	1	17	1531,0	0,000000	Sim
Argamassa	1,84	3	1	55,9	0,000000	Sim
Erro	0,22	20	0			

(fonte: própria do autor)

Na Figura 36 fica clara a diferença de resistência à tração na flexão apresentada pela argamassa MMU, a qual apresentou valor médio quase duas vezes superior às demais.

Figura 36 – Influência do agregado na resistência à tração na flexão aos 28 dias



(fonte: própria do autor)

Fez-se análise de comparação de médias por Fisher, concluindo que a resistência à tração na flexão da argamassa MMU é estatisticamente diferente e maior que todas as demais. Esta mesma comparação permitiu verificar que a argamassa REF apresenta resultados de resistência a tração na flexão iguais as argamassas MTF e BAS; e essas apresentaram resultados estatisticamente iguais entre si.

#### 6.2.4 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial média das argamassas está apresentada na Tabela 28. De acordo com a NBR 13.281 (ABNT, 2005), a argamassa MMU é classificada como P4, pois possui resistência à compressão superior a 4,0 MPa, enquanto a argamassa BAS é classificada como P3, tendo resistência à compressão superior a 3,0 MPa, sendo esta superior ao restante das argamassas, situadas na faixa abrangida pela P2, que varia de 1,5 a 3,0 MPa.

Tabela 28 – Resistência à compressão axial

Argamassa	Média (MPa)	Desvio Padrão (Mpa)	CV (%)	Classificação NBR 13281
Arg. REF	2,97	0,11	4%	P2
Arg. MTF	2,49	0,15	6%	P2
Arg. MMU	4,62	0,46	10%	P4
Arg. BAS	3,33	0,36	11%	P3

(fonte: própria do autor)

Para Tristão (1995), o aumento do módulo de finura gera uma tendência de aumento na resistência à compressão, fato este que é comprovado quando se compara a resistência de 3,3 MPa da argamassa BAS (agregado com módulo de finura de 2,20) com a resistência de 2,97 MPa da argamassa REF (agregado com módulo de finura 1,72). No entanto não é possível estabelecer esta relação quando a diferença do módulo de finura é pequena, como é o caso da argamassa REF e a argamassa MTF, as quais apresentam resultados de resistência que se contrapõe ao proposto por Tristão. Além dessas, a argamassa MMU apresenta valor intermediário de módulo de finura, no entanto, sua resistência à compressão foi a maior, o que nos indica que esse parâmetro tem maior correlação com a densidade de massa da argamassa do que propriamente com o módulo de finura.

Ainda que a densidade de massa e o módulo de finura justifiquem a resistência da argamassa BAS, esta pode ser explicada também devido à grande quantidade de material pulverulento presente na areia basáltica, o que possivelmente causou o “efeito filer”, ou seja, pode ter melhorado o empacotamento da mistura, aumentando sua resistência (CABRAL, 2007).

Os valores de resistência à compressão foram inseridos no software Statistica para avaliação quanto a Análise de Variância. Os resultados desta análise são apresentados na Tabela 29 e indicam que há influência do agregado na resistência a compressão.

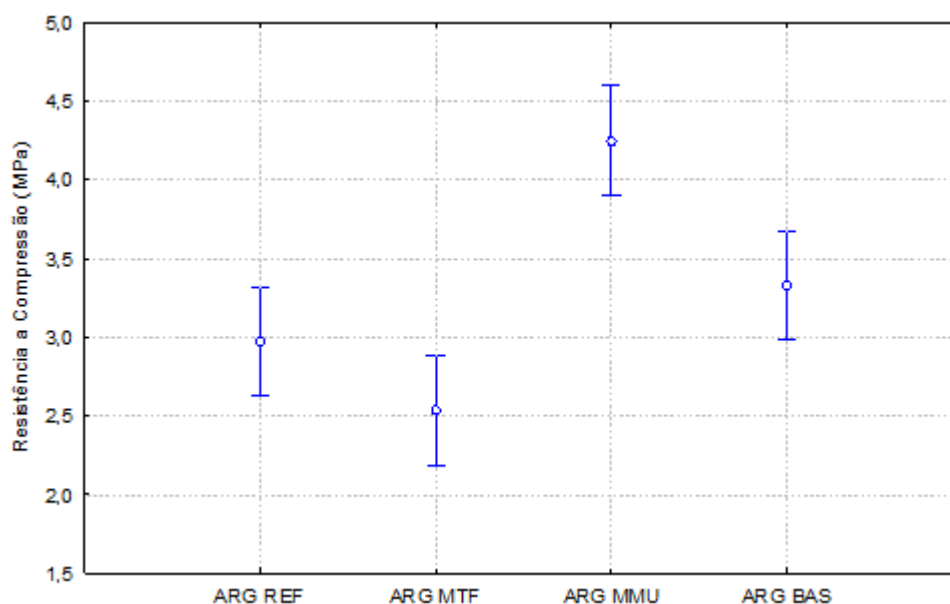
Tabela 29 – ANOVA: resistência à compressão axial

Efeito	Soma dos Quadrados	GL	Médias quadraticas	Teste F	p-nível	Significância
Argamassa	9,51	3	3	19,0	0,000004	Sim
Erro	3,33	20	0	-	-	

(fonte: própria do autor)

A Figura 37 apresenta os valores de resistência à compressão axial aos 28 dias das argamassas ensaiadas, evidenciando a maior resistência obtida na argamassa MMU. Silva (2003) realizou estudos em argamassas com a mesma relação aglomerante: agregado e obteve valores de resistência variando de 3,5 a 4,5 MPa, assemelhando-se aos valores encontrados neste trabalho.

Figura 37 – Influência do agregado na resistência à compressão axial aos 28 dias dos diferentes tipos de argamassa



(fonte: própria do autor)

Fez-se análise de comparação de médias por Fisher, concluindo que a resistência a compressão da argamassa MMU é estatisticamente diferente e maior que as demais. Esta mesma comparação permitiu verificar que a argamassa REF apresenta resultados de resistência à compressão estatisticamente iguais as argamassas MTF e BAS; essas apresentam resultados estatisticamente iguais entre si.

### 6.2.5 Absorção de água por capilaridade

A Tabela 30 apresenta o coeficiente de capilaridade, bem como a classificação das argamassas quanto a este na NBR 13.281 (ABNT, 2005). As argamassas REF, MTF e MMU são classificadas na classe C5, que abrange coeficientes dentre 5,0 e 12 g/dm<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>; já a argamassa BAS pertencem a classe C6, pois apresentam coeficiente de capilaridade maior que 12 g/dm<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>.

Tabela 30 – Absorção de água por capilaridade

Argamassa	Tempo (min)	Absorção média (g/cm <sup>2</sup> )	Cmédio (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	Desvio Padrão	CV (%)	Classificação NBR 13281
Arg. REF	10	0,41	11,52	0,41	3,53	C5
	90	1,13				
Arg. MTF	10	0,45	10,17	0,36	3,59	C5
	90	1,09				
Arg. MMU	10	0,21	8,25	0,41	4,97	C5
	90	0,70				
Arg. BAS	10	0,58	13,05	0,53	4,09	C6
	90	1,39				

(fonte: própria do autor)

A maior absorção e, por consequência, maior coeficiente de capilaridade da argamassa BAS deve-se, possivelmente, ao fato de o agregado basáltico ter maior capacidade de absorção de água (3,3%) e, portanto, argamassas com maior quantidade deste agregado tendem a absorver mais água. Tristão (2005) também chegou a esta conclusão quando comparou argamassas com areia de pedra com argamassa de areia de duna, concluindo que o tipo de areia tem significativa influência na absorção de água da argamassa.

Ainda que tenha em sua composição granulométrica 40% de basalto, o menor coeficiente de capilaridade da argamassa MMU se deve ao fato desta possuir baixo índice de vazios e maior densidade de massa no estado endurecido. Fez-se análise de comparação de médias por Fisher, concluindo que o coeficiente de capilaridade é estatisticamente diferente entre todas as argamassas. Na Tabela 31 estão apresentados os resultados de Análise de Variância, na qual verifica-se que existe influência significativa do agregado na absorção de água por capilaridade das argamassas, tanto aos 10 quanto aos 90 minutos.

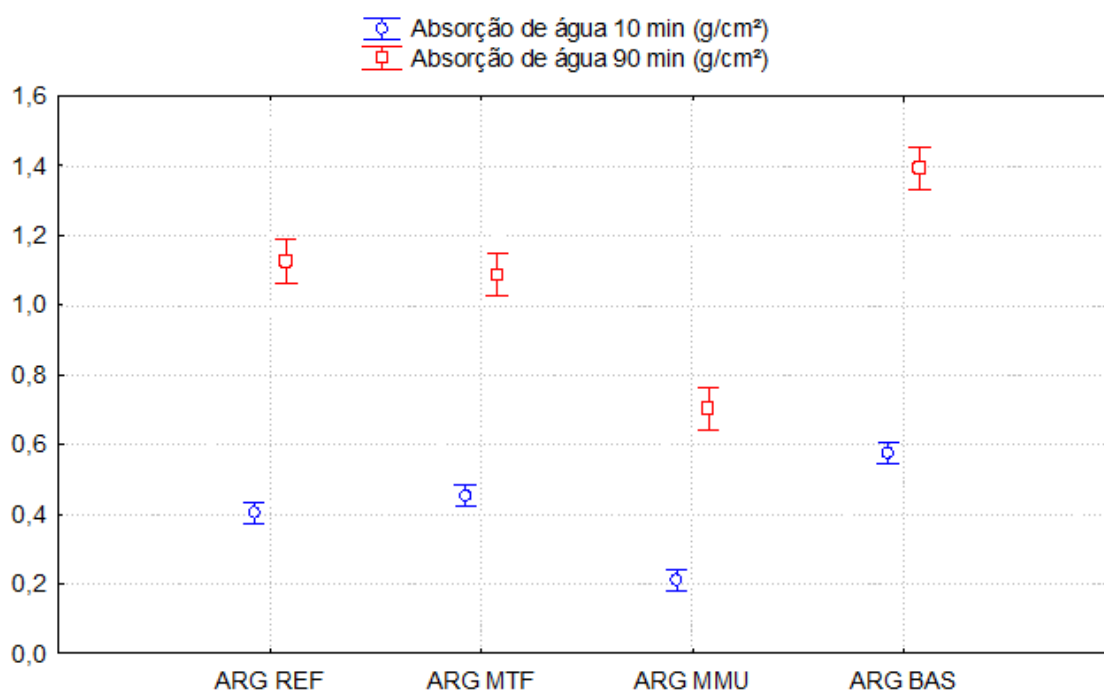
Tabela 31 – ANOVA: absorção de água por capilaridade aos 10 minutos

Tempo	Efeito	Soma dos Quadrados	GL	Médias quadraticas	Teste F	p-nível	Significância
10 min	Argamassa	0,41	3	0	105,2	0,000000	Sim
	Erro	0,03	20	0	-	-	
90 min	Argamassa	1,45	3	0	88,9	0,000000	Sim
	Erro	0,11	20	0	-	-	

(fonte: própria do autor)

Nas Figura 38 estão apresentados os valores de absorção de água de cada argamassa aos 10 e 90 minutos. Através da análise de comparação de médias por Fisher, concluiu-se que a absorção de água por capilaridade é estaticamente diferente aos 10 minutos e estatisticamente igual aos 90 minutos para as argamassas REF e MTF, sendo, em ambos os casos, diferente das demais.

Figura 38 – influência do agregado na absorção de água aos 10 e 90 minutos dos diferentes tipos de argamassa



(fonte: própria do autor)

## 6.2.6 Retração

Tabela 32 apresenta os resultados de retração média aos 28 dias, bem como a variação de massa para os mesmos corpos de prova. Conforme determina a NBR 15.261 (ABNT, 2005), nesta tabela também está representado o desvio absoluto máximo da variação dimensional, que não poderia ultrapassar 0,20mm/m. Os valores com sinal negativo significam que houve redução de comprimento e/ou de massa após 28 dias da moldagem, ou seja, a argamassa retraiu.



Tabela 32 – Retração e variação de massa aos 28 dias das diferentes argamassas

Argamassa	Retração média (mm/m)	Desvio Abs. Máximo (mm/m)	Variação de massa média (%)	Desvio Abs. Máximo (%)
Arg. REF	0,204	0,003	-1,981	0,212
Arg. MTF	0,231	0,006	-2,102	0,376
Arg. MMU	0,306	0,011	-2,952	0,297
Arg. BAS	0,320	0,003	-3,925	0,295

(fonte: própria do autor)

Percebe-se que a retração é diretamente proporcional à variação de massa e que ambas são influenciadas pelo agregado, visto que seu aumento se deu conforme o aumento o teor de areia basáltica na mistura. Para os autores Yool e Less (1998), as retrações em revestimento de argamassa são diretamente proporcionais ao teor de material pulverulento e de argila nas areias. Pode-se observar também que os resultados são diretamente proporcionais a retenção de água da argamassa no estado fresco (Tabela 16), pois ainda que a quantidade de cal hidratada seja a mesma (grande responsável pela retenção de água), a argamassa BAS apresentava menor teor.

Embora o consumo de cimento tenha grande relevância, sendo diretamente proporcional à retração das argamassas, os resultados apresentados na Tabela 32 sofreram influência basicamente do agregado, visto a grande semelhança na quantidade de cimento de cada traço, conforme apresentado na Tabela 36. Portanto, os maiores valores de retração apresentados pela argamassa moldada puramente com agregado basáltico se devem à grande quantidade de material pulverulento da mistura.

Silva *et al.* (2007) avaliaram a influência da areia proveniente de rio e da areia britada de rocha calcária na fissuração de revestimento de argamassas e concluíram que o tipo de agregado influenciou significativamente na incidência de fissuras dos revestimentos, sendo maiores em argamassas com agregado britado. Tristão (2005) também chegou à esta conclusão quando comparou argamassas de areia de rio com argamassas de areia de britagem de rocha granítica, o que leva a concluir que o formato dos grãos tem influência significativa na retração das argamassas.

Os valores de retração encontrados neste trabalho podem ser considerados baixos, visto que Silva (2011) realizou este mesmo ensaio em argamassas com relação aglomerante: agregado

semelhante e obteve retrações de aproximadamente 1,20 mm/m. Este mesmo autor concluiu que argamassas com areia britada apresentam alto teor de finos, o que as confere elevada rigidez, aumentando as tensões capilares, o que provoca maior retração.

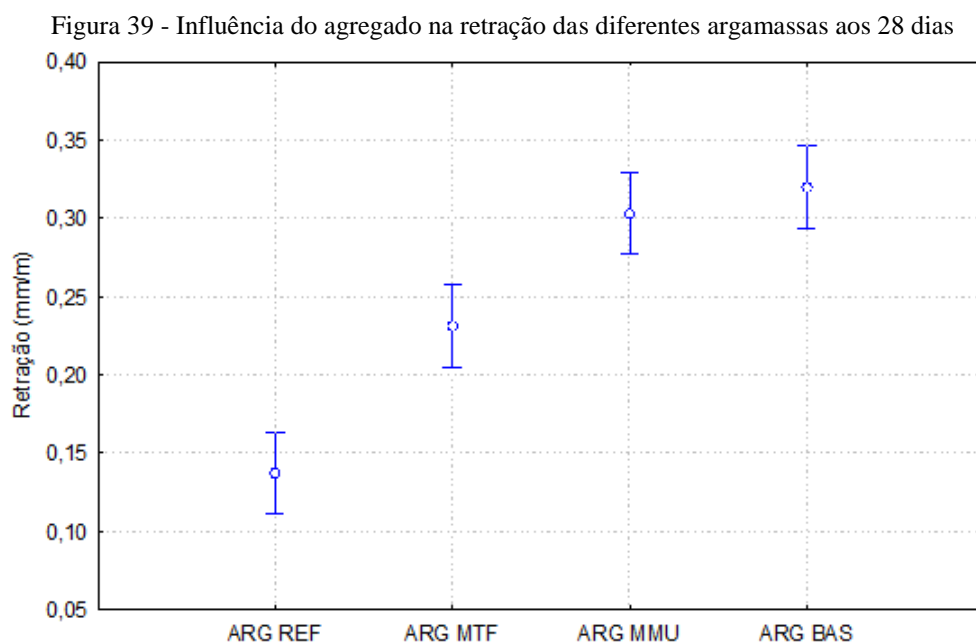
Os valores de retração das argamassas aos 28 dias foram submetidos ao software Statistica para a Análise de Variância. Os resultados são apresentados na Tabela 33 e indicam que há influência do agregado na retração das argamassas.

Tabela 33 – ANOVA: retração da argamassa aos 28 dias

Efeito	Soma dos Quadrados	GL	Médias quadráticas	Teste F	p-nível	Significância
Argamassa	0,08	3	0	47,9	0,000001	Sim
Erro	0,01	12	0	-	-	

(fonte: própria do autor)

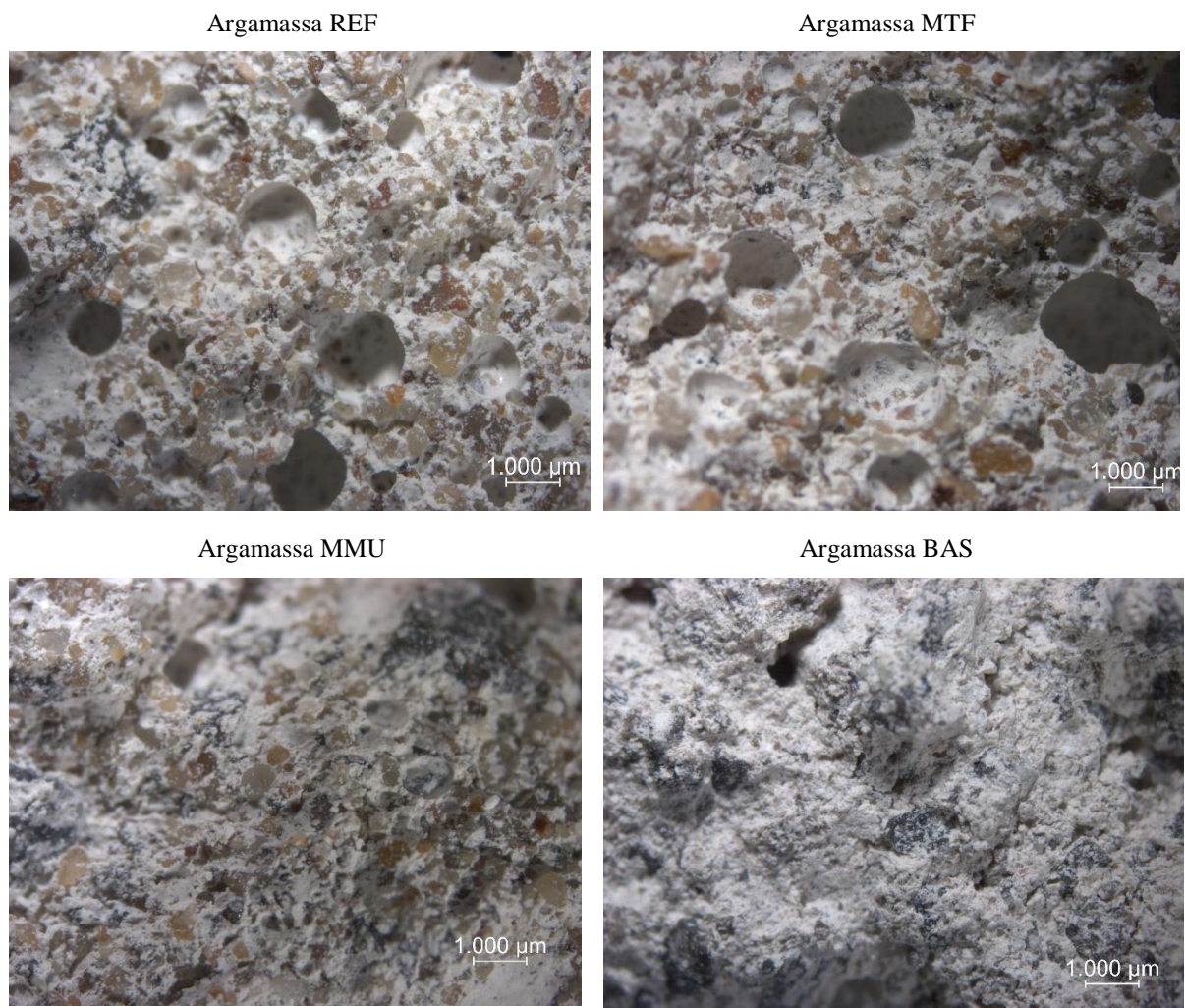
A Figura 39 mostra a retração apresentada pelas argamassas aos 28 dias, evidenciando a ocorrência de maiores retrações conforme ocorria o incremento de agregado basáltico na mistura. Porém, conforme análise de comparação de médias por Fisher, conclui-se que a retração das argamassas MMU e BAS aos 28 dias é estatisticamente igual, o que pode indicar que a partir da mistura de 40% de agregado basáltico o aumento da retração é pequeno. Conclui-se ainda que, quanto a retração, as argamassas REF e MTF são diferentes entre si.



(fonte: própria do autor)

Para visualizar os efeitos das diferentes composições granulométricas na estrutura, as argamassas foram analisadas em microscópio e as imagens então apresentadas na Figura 40. Segundo Mehta e Monteiro (1994), os vazios do ar incorporado têm formato geralmente esférico, o que pode ser facilmente percebido nas argamassas REF e MTF, as quais tem significativo teor de ar incorporado (Tabela 18). A argamassa BAS também possui elevado teor de ar incorporado no estado fresco, porém, devido à grande quantidade de material pulverulento presente no agregado, os vazios são de difícil visualização. Na argamassa MMU é possível perceber um reduzido número de vazios, assim como também era reduzido seu teor de ar incorporado, devido ao maior empacotamento.

Figura 40 – Microscopia ótica: distribuição do agregado nas argamassas no estado endurecido



(fonte: própria do autor)

A Tabela 34 apresenta, resumidamente, os valores obtidos dos ensaios realizados no estado endurecido, ela tem por objetivo facilitar o entendimento do comportamento das argamassas de acordo com a variação proposta no agregado.

Tabela 34 – Resumo dos resultados obtidos no estado endurecido

Argamassa	Modulo de elasticidade dinâmico (MPa)	Densidade de massa (kg/m <sup>3</sup> )	Tração na flexão (MPa)	Compressão axial (MPa)	Absorção de água por capilaridade (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	Retração (mm/m)
REF	3664,36	1769,03	0,74	2,97	11,52	0,204
MTF	3703,12	1796,81	0,65	2,49	10,17	0,231
MMU	4084,78	1854,34	1,31	4,62	8,25	0,306
BAS	3712,00	1844,17	0,72	3,33	13,05	0,320

(fonte: própria do autor)

### 6.3 ANÁLISE ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO DO AGREGADO BASÁLTICO

Assim como proposto inicialmente, a seguir serão apresentados os custos de produção de cada uma das argamassas do presente trabalho. Os custos unitários dos materiais adquiridos na região da Serra do RS, foco deste estudo, são apresentados na Tabela 35.

Tabela 35 – Custo unitário dos materiais

Custo unitário dos materiais		
Material	Unidade	Custo
Cimento CP II F	kg	R\$ 1,75
Cal Hidratada CH III	kg	R\$ 2,11
Areia quartzosa	m <sup>3</sup>	R\$ 140,00
Areia basáltica	m <sup>3</sup>	R\$ 59,00
Água	m <sup>3</sup>	R\$ 3,50

(fonte: própria do autor)

Em posse destes valores e da quantidade de material utilizado em cada argamassa (Tabela 14), foi possível determinar consumo de cimento, cal e agregados por metro cúbico (Tabela 36) e, posteriormente, o custo para produção de cada uma delas, conforme apresentado na Tabela 37.

Tabela 36 – Consumo por m<sup>3</sup> dos componentes das argamassas

Argamassa	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Cal Hidratada (kg/m <sup>3</sup> )	Areia Quartzosa (Kg/m <sup>3</sup> )	Areia Basáltica (Kg/m <sup>3</sup> )	Água (l/m <sup>3</sup> )
REF	154,44	107,44	1510,83	-	311,35
MTF	153,38	106,70	1222,88	291,05	317,64
MMU	152,00	105,74	892,19	623,65	328,32
BAS	155,40	108,10	-	1593,93	322,09

(fonte: própria do autor)

Tabela 37 – Custo de produção das argamassas por m<sup>3</sup>

Custo de produção das argamassas		
Argamassa	Custo	% de redução
REF	R\$ 709,74	-
MTF	R\$ 683,21	3,7
MMU	R\$ 652,13	8,1
BAS	R\$ 595,38	16,1

(fonte: própria do autor)

Visto a pequena variação quanto ao consumo de cimento e cal de cada argamassa, tem-se como grande variante no custo da argamassa o agregado utilizado. Como era esperado, a argamassa produzida com agregado da região apresentou custo significativamente menor, quando comparada à argamassa produzida com agregado que necessita ser transportado cerca de 100 quilômetros antes de chegar ao local de consumo.

Além do viés ecológico de utilizar um agregado produzido da região, evitando a extração de areia de rios e a poluição causada pelo transporte, o custo é outro fator de grande relevância, visto o percentual de redução de gastos na produção de argamassas.

## 6.4 ANÁLISE CRÍTICA DO MELHOR TEOR DE SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO NATURAL PELO BRITADO DE BASALTO

As diferentes misturas de agregados geraram argamassas com relativa semelhança entre si, por vezes até iguais estatisticamente. Avaliando os resultados tecnicamente, conclui-se que a argamassa MMU apresentou as melhores características nos ensaios do estado fresco e

endurecido, a exceção dos valores mais elevados apresentados no ensaio de retração, quando comparado a argamassa REF, já que esta se trata de uma característica não desejável.

Embora seja vantajosa financeiramente, a argamassa MTF apresentou baixa variação nos resultados dos ensaios, sendo estes muito semelhantes ao da argamassa REF. A argamassa MMU apresenta valores de resistência à compressão dentro da faixa recomendada para revestimentos externos (2,5 a 9,0 MPa) ou internos (1,5 a 6,5MPa) da tabela<sup>2</sup> suprimida da NBR 13.281 (ABNT, 2005), no entanto, é necessário avaliar seu comportamento quanto à aderência, já que a resistência influencia na conexão entre o revestimento e a base. Quanto à argamassa BAS, seus resultados equivaleram aos da argamassa REF, a exceção da sua maior retração e menor custo de produção, portanto, a utilização de basalto britado em argamassas de revestimento como único agregado é interessante financeiramente, e, tecnicamente, deve-se levar em consideração o fato desta apresentar maior retração.

Nas Figura 41 e Figura 42 estão apresentados graficamente os resultados obtidos dos ensaios realizados nas argamassas, o que permite uma visão geral dos resultados.

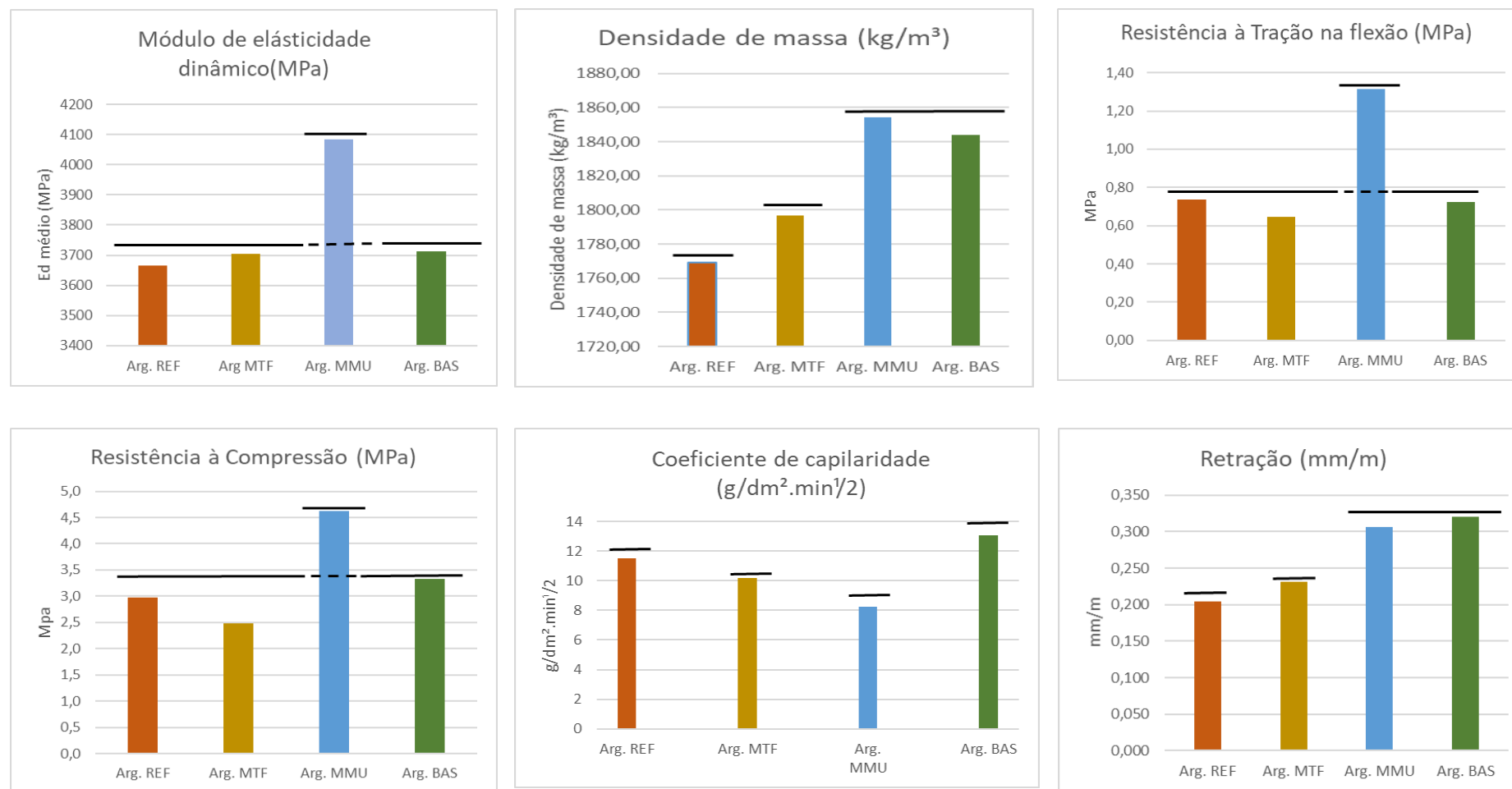
---

<sup>2</sup> Notas de aula Professora Angela Borges Masuero – Edificações - UFRGS





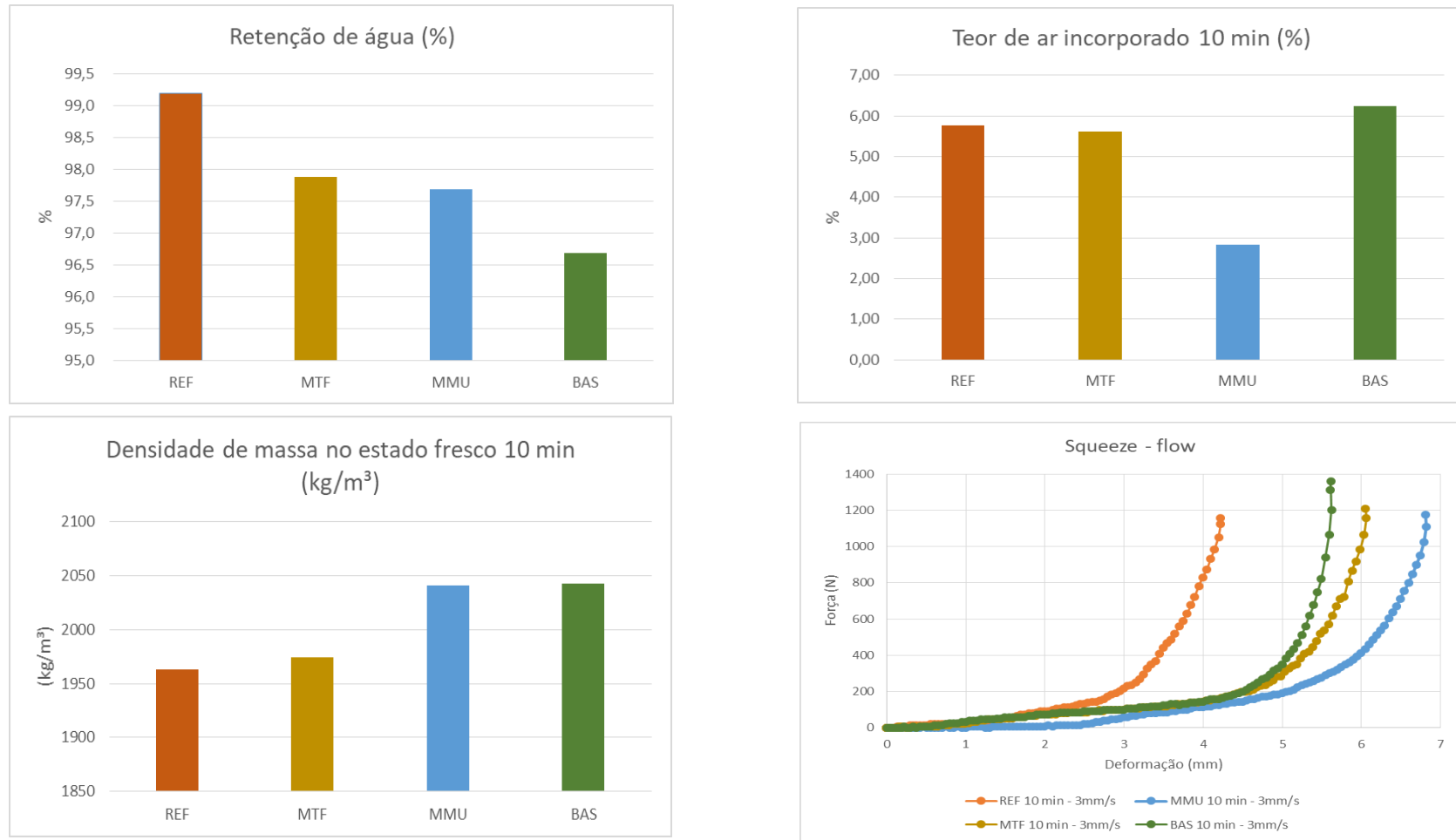
Figura 41 – Compilação dos resultados dos ensaios no estado endurecido



(fonte: própria do autor)



Figura 42 – Compilação dos resultados dos ensaios no estado fresco



(fonte: própria do autor)

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve por objetivo avaliar a possibilidade de utilização de agregado britado de rocha basáltica em um traço de argamassa de revestimento de cimento e cal. Os resultados obtidos limitam-se aos materiais e métodos descritos, podendo ocorrer variação de resultados em caso de alteração dessas condições (composição granulométrica do basalto e da areia utilizados, tipo de cimento e cal, traço, relação água/aglomerante, condições de cura, entre outros).

A areia britada proveniente da rocha basáltica apresenta grande quantidade de material pulverulento em sua composição, no entanto, o consumo de cimento e de água na mistura para se obter uma argamassa com a mesma consistência que a argamassa referência (espalhamento de 260mm) não teve grande aumento. Além da maior quantidade de material pulverulento, as duas areias diferenciam-se principalmente quanto ao formato dos grãos, classificado como de baixa esfericidade e baixo arredondamento para o agregado basáltico, e de baixa esfericidade e alto grau de arredondamento para o agregado quartzoso.

Embora todos os resultados tenham sofrido influência do agregado, vide análise feita através da ANOVA, apenas o traço do agregado com maior massa unitária (MMU) apresentou resultados no estado fresco substancialmente diferentes, a destacar, por exemplo, seu teor de ar incorporado de 2,82%, enquanto o restante das argamassas apresentou valores de aproximadamente 6,0%, o que é justificável pelo melhor empacotamento dos grãos desta composição. Quanto à densidade de massa da argamassa no estado fresco, houve aumento desta conforme se deu o incremento de agregado basáltico, apresentando uma diferença de 80 kg/m<sup>3</sup> entre a argamassa REF e a argamassa BAS.

Para os resultados no ensaio endurecido as diferenças entre as argamassas ficaram mais evidentes, porém, assim como no estado fresco, é possível destacar uma maior diferenciação para a argamassa MMU. O maior módulo de elasticidade desta argamassa condiz com os maiores valores de resistência à tração (1,31MPa) e à compressão (4,62MPa) quando comparada às demais, as quais apresentaram resistência à tração e à compressão de aproximadamente 0,7MPa e 3,0 MPa, respectivamente.

Quanto ao coeficiente de capilaridade, a argamassa MMU apresentou o menor valor, de 8,25 g/dm<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>, enquanto as argamassas REF, MTF e BAS apresentaram coeficiente de 11,52, 10,17 e 13,05 g/dm<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>, respectivamente. A reduzida absorção da argamassa com maior empacotamento se deve, possivelmente, ao fato desta possuir menos vazios e também uma quantidade de material pulverulento menos elevada quanto a argamassa BAS.

Assim como era esperado, as argamassas apresentaram maior retração conforme se deu o aumento de material pulverulento na mistura; no entanto, ainda que este seja um fator negativo, mesmo a argamassa BAS, que apresentou retração de 0,32 mm/m, é considerada satisfatória quanto a este quesito. Em todos os parâmetros analisados nesse trabalho, a utilização da areia basáltica produziu argamassas com resultados iguais ou melhores aos da argamassa com agregado comumente utilizado, a argamassa REF.

Em função dos resultados apresentados durante este trabalho, a utilização do agregado basáltico em argamassas de revestimento como único agregado da mistura mostra-se viável, tanto tecnicamente quanto financeiramente, visto que a semelhança de consumo de aglomerante das argamassas fez com que o agregado fosse o grande variante quanto ao custo de produção, e, já que o agregado basáltico (que é produzido na própria região) apresenta valores de comercialização aproximadamente 45% menores que o agregado quartzoso, as argamassas resultaram em redução de custo conforme se deu o incremento do agregado britado.

Ainda que a argamassa BAS tenha menor custo de fabricação e seja semelhante tecnicamente à argamassa REF, fica evidente que, pelos resultados obtidos dos ensaios, a argamassa MMU é a bastante recomendada para uso, visto que esta consegue alinhar economia de produção e apresentar resultados significativamente melhores que as demais, a exceção da retração. Conforme já citado, o fato do agregado basáltico ser produzido na região faz com que seja eliminado, tanto o custo quanto o dano ambiental causado pelo transporte. Além disso, a utilização desse agregado irá diminuir a quantidade de material a ser extraído de rios, diminuindo fortemente os danos ambientais causados por tal ação.

Como sequencia deste trabalho, fica a recomendação para que sejam feitos estudos da aderência desta argamassa ao substrato bem como a avaliação da utilização de areia basáltica em traços de argamassa mais pobre, tendo por foco a aplicação em revestimentos internos.



## REFERENCIAS

ALMEIDA, F. Cinco anos após denúncia, fiscalização da extração de areia no Rio Jacuí ainda é frágil. **G1 RBS TV**, Porto Alegre, não paginado, 23 de abril 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/cinco-anos-apos-denuncia-fiscalizacao-da-extracao-de-areia-no-rio-jacui-ainda-e-fragil.ghtml>>. Acesso em: 05 mai. 2018.

ALVES, J. D. **Materiais de construção**. 6. ed. Goiânia: Editora da Universidade Federal de Goiás, 1987.

AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de Construção**: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório. 1. ed. São Paulo: Pini, 2012.

ANEPAC. **Mercado – Perspectivas para o Setor de Agregados**. Novembro 2015. Disponível em: <http://www.anepac.org.br/agregados/mercado>>. Acesso em: 05 mai. 2018.

ANGELIM, R. R.; ANGELIM, S. M.; CARASEK, H. **Influência da distribuição granulométrica da areia no comportamento dos revestimentos de argamassa**. Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, V, São Paulo - SP. Anais... ANTAC, 2003, p. 141.

ARGENTA, E. Preço da areia dobrou nas lojas de material de construção desde a proibição de extração no Rio Jacuí. *Gaúcha Zero Hora*, Porto Alegre, não paginado, 23 maio 2013. Disponível em: < <https://gauchazh.clicrbs.com.br/economia/noticia/2013/05/preco-da-areia-dobrou-nas-lojas-de-material-de-construcao-desde-a-proibicao-de-extracao-no-rio-jacui-cj5v8h1k1014nxbj0spr6zisy.html>>. Acesso em: 19 out. 2017.

ABNT. **NBR 7175**: cal hidratada para argamassas – requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 7200**: execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimento. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222**: concreto e argamassa - determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 7389-1**: agregados – análise petrográfica de agregado para concreto – Parte 1: agregado miúdo. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 9779**: argamassa e concretos endurecidos – determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 9935**: agregados – terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 11578**: cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 13276**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 13277**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13278**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13279**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13280**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13281**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 15259**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 15261**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 15630**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 15839**: argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – caracterização reológica pelo método squeeze-flow. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23**: cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 26**: agregados – amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45**: agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46**: agregados – determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.

CABRAL, K. O. Influência da areia artificial oriunda da britagem de rocha granito-gnaiss nas propriedades do concreto convencional no estado fresco e endurecido. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Déficit Habitacional**, 22 agosto 2017. Disponível em: < <http://www.cbicdados.com.br/menu/deficit-habitacional/deficit-habitacional-no-brasil>>. Acesso em: 17 nov. 2017.

CAMPOS, E .E.; FRAZÃO, E. B.; CALAES, G. D.; HERRMANN, H. **Agregados para a construção civil no Brasil** – Contribuições para formulação de políticas públicas. Belo Horizonte: CETEC, 2007.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: Ibracon, 2007. p. 863-904. v. 2

CARDOSO, F. A. Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico. Tese de doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CARVALHO, E. F. T. **O concreto sem mistérios** – Uma abordagem inédita para engenheiros e arquitetos dominarem sua tecnologia. Ouro Preto: UFOP, 2012.

CECHIN, L.; TOKARSKI, R. B.; TRENTTO, T. P.; MATOSKI, A. Utilização de areia industrial em argamassas de revestimento. **Revista Principia**, João Pessoa, p. 77-87, junho 2016.

CINCOTTO, M. A. **Patologia das argamassas de revestimento: Análise e recomendações**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1989. (Publicação IPT 1801)

CINCOTTO, M. A.; QUARCIONI, V. Â.; JOHN, V. M. Cal na Construção Civil. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: Ibracon, 2007. p. 695-725. v. 2.

COSTA, M. J. **avaliação do uso da areia artificial em concreto de cimento portland: aplicabilidade de um método de dosagem**. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Regional do Nordeste do estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2005.

DAL BELLO, A. C. Estudo comparativo da resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa aplicados manualmente e com projeção mecânica contínua. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

GIORDANI, C. **Influência da cal hidratada no comportamento de argamassas mistas**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

HOLSBACH, T. S. **Avaliação da substituição da areia natural por areia artificial em argamassa de cimento cal e areia para assentamento**. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Regional do Nordeste do estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2004.

JORNAL DO COMÉRCIO. **Entidade se mobilizam pelo zoneamento do lago Guaíba para extração de areia**, 08 junho 2017. Disponível em:



<[http://jcrs.uol.com.br/\\_conteudo/2017/06/economia/567033-entidades-se-mobilizam-pelo-zoneamento-do-lago-guaiba-para-extracao-de-areia.html#](http://jcrs.uol.com.br/_conteudo/2017/06/economia/567033-entidades-se-mobilizam-pelo-zoneamento-do-lago-guaiba-para-extracao-de-areia.html#)>. Acesso em: 17 nov. 2017.

KUCK, D. W. Areia artificial reduz impacto ambiental de construção civil. **Instituto Ciência Hoje On-line**, não paginado, 31 janeiro 2003. Disponível em: <[http://www.cienciahoje.org.br/noticia/v/ler/id/62/n/areia\\_artificial\\_reduz\\_impacto\\_ambiental\\_de\\_construcao\\_civil](http://www.cienciahoje.org.br/noticia/v/ler/id/62/n/areia_artificial_reduz_impacto_ambiental_de_construcao_civil)>. Acesso em: 17 out. 2017.

LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. **Manual de Agregados** para a construção civil. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012.

MATTOS, L. R. S. **Identificação e caracterização das argamassas para revestimento externo utilizadas na cidade de Belém-PA**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994.

MOTOKI, A.; ZUCCO, L. L.; VARGAS, T.; NEVES, J. L. P.; Anais 2º Congresso Brasileiro de Extensão Universitária. **Basalto da Serra Gaúcha e sua relação com o desenvolvimento regional**. Belo Horizonte, 2004.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman Editora LTDA, 2013.

PANDOLFO, L. M. **Influência das características físicas da área de britagem nas propriedades das argamassas**. Trabalho não publicado. Tese de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PINTO, J. A. N. **Elementos para a Dosagem de Argamassa**. 2. ed. Santa Maria: Multipress, 1996.

QUIROGA, P.N; FOWLER, D. W. **The effects of aggregates characteristics on the performance Portland cement concrete**. Research report ICAR – 104-1F. The University of Texas at Austin, Texas, 2004, 78712-0277.

RECENA, F.A. P. **Conhecendo a Argamassa**. 2. ed. Porto Alegre: ediPUCRS, 2012

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Mapa Rio Grande do Sul. Disponível em: [http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia\\_basica/cartografia\\_regional/mapa\\_rio\\_grande\\_sul.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/cartografia_regional/mapa_rio_grande_sul.pdf). Acesso em: 05 jan. 2018.

SANTOS, A. **Areia natural ou artificial?** Custos e características técnicas determinam a opção para a escolha do material mais adequado. 13 maio 2009. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/areia-natural-ou-artificial>>. Acessado em: 18 nov. 2017.

SILVA, N. G. **Avaliação da retração e da fissuração em revestimentos de argamassa na fase plástica.** Tese de doutorado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

SILVA, D. A.; TRISTÃO, F. A.; ROMAN, H. R.; SOUZA, F. K. **Argamassas intermediárias de cal e areia para revestimento: efeitos das características das areias.** Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, V, São Paulo- SP. Anais... ANTAC, 2003, p. 299.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C.; GLEIZE, P. J. P. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária.** Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, VII, Recife-PE. Anais... ANTAC, 2007, 12 p.

STOLZ, C. M. **Análise dos principais parâmetros que influenciam na área de contato substrato/argamassa de revestimento.** Tese de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

TEODORO, S. B. **Avaliação do uso da areia de britagem na composição do concreto estrutural.** Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013.

TRISTÃO, F. A., MACHADO, V. K. C. B. L. V Simpósio brasileiro de tecnologia das argamassas. **Análise de métodos de retenção de água e consistência em argamassas.** São Paulo, São Paulo, 2003.

TRISTÃO, F. A. **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades da argamassa de revestimento.** Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.

TRISTÃO, F. A. Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento. Tese de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

VIACELLI, L. **Estudo da viabilidade da utilização do agregado miúdo britado em concreto convencional.** Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2012

WESTERHOLM, M., LAGERBLAND, B., SILFWERBRAND, J., FORSSBERG, E. Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. In.: **Cement and Concrete Composites**, 30, 2008, 274-282.

YOOL, A.; LEES, T. P. **The potential shrinkage of mortars: effects of sand characteristics.** Masonry International, v. 11, n. 3, p. 89-96, 1998.

**APÊNDICE A – Resultados dos três ensaios de reometria rotacional  
realizados nas argamassas**

Ensaio	Tempo (s)	Taxa de cisalhamento (1/s)	Argamassa MMU 1	Argamassa MMU 2	Argamassa MMU 3	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação
Tensão de cisalhamento (Pa)	10	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0%
	20	20	361,82	365,67	364,84	364,11	2,03	1%
	30	40	207,14	231,85	206,89	215,29	14,34	7%
	40	60	225,16	205,73	193,89	208,26	15,79	8%
	50	80	211,99	195,77	192,90	200,22	10,29	5%
	60	100	182,36	212,41	181,11	191,96	17,72	9%
	70	80	167,31	217,32	-	192,10	21,67	11%
	80	60	152,97	194,50	-	183,03	28,63	16%
	90	40	136,22	192,18	-	168,97	28,97	17%
	100	20	110,27	166,71	-	151,35	35,68	24%
	110	0	0,00	0,00	-	69,24	83,21	0%
Viscosidade (Pa·s)	10	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0%
	20	20	18,09	18,28	18,24	18,20	0,10	1%
	30	40	5,18	5,80	5,17	5,38	0,36	7%
	40	60	3,75	3,43	3,23	3,47	0,26	8%
	50	80	2,65	2,45	2,41	2,50	0,13	5%
	60	100	1,82	2,12	1,81	1,92	0,18	9%
	70	80	2,09	2,72	-	2,11	0,44	21%
	80	60	2,55	3,24	-	2,65	0,49	18%
	90	40	3,41	4,80	-	3,50	0,99	28%
	100	20	5,51	8,33	-	5,51	2,00	36%
	110	0	0,00	0,00	-	3,46	0,00	0%
Ensaio	Tempo (s)	Taxa de cisalhamento (1/s)	Argamassa BAS 1	Argamassa BAS 2	Argamassa BAS 3	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação
Tensão de cisalhamento (Pa)	10	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0%
	20	20	318,42	317,78	300,05	312,08	10,43	3%
	30	40	162,02	172,11	184,44	172,86	11,23	6%
	40	60	154,01	165,00	172,40	163,80	9,25	6%
	50	80	153,11	160,49	157,52	157,04	3,72	2%
	60	100	157,66	159,08	168,74	161,82	6,03	4%
	70	80	154,37	144,73	147,96	149,02	4,90	3%
	80	60	166,71	132,70	130,84	143,42	20,19	14%
	90	40	170,36	112,24	125,60	136,07	30,44	22%
	100	20	177,30	81,40	105,22	121,31	49,93	41%
	110	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0%
Viscosidade (Pa·s)	10	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0%
	20	20	15,92	15,89	15,00	15,60	0,52	3%
	30	40	4,05	4,30	4,61	4,32	0,28	6%
	40	60	2,57	2,75	2,87	2,73	0,15	6%
	50	80	1,91	2,01	1,97	1,96	0,05	2%
	60	100	1,58	1,59	1,69	1,62	0,06	4%
	70	80	1,93	1,81	1,85	1,86	0,06	3%
	80	60	2,78	2,21	2,18	2,39	0,34	14%
	90	40	4,26	2,81	3,14	3,40	0,76	22%
	100	20	8,86	4,07	5,26	6,07	2,50	41%
	110	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0%

**APÊNDICE B – Resultados individuais dos ensaios no estado endurecido  
realizados nas argamassas**

Fator controlável	Densidade de massa (kg/m³)	Módulo de elasticidade (Mpa)	Resistência Compressão (Mpa)		Resistência tração na flexão (Mpa)	Absorção de água 10min (g/cm²)	Absorção de água 90min (g/cm²)	Coefficiente de capilaridade (g/dm².min¹/²)	Retração (mm/m)
ARG REF	1774,78	3699,79	2,39	3,39	0,77	0,391	1,095	11,26	0,144
ARG REF	1790,80	3726,55	3,24	2,96	0,77	0,404	1,096	11,08	0,148
ARG REF	1762,16	3677,94	3,37	2,85	0,77	0,436	1,196	12,17	0,132
ARG REF	1767,96	3649,87	2,82	2,88	0,74	0,411	1,138	11,63	0,124
ARG REF	1753,06	3596,73	3,13	2,89	0,66	0,397	1,099	11,24	
ARG REF	1765,42	3635,24	2,86	2,91	0,72	0,394	1,129	11,75	
ARG MTF	1887,73	3807,69	2,85	2,35	0,57	0,437	1,029	9,47	0,216
ARG MTF	1799,72	3699,01	3,05	2,49	0,62	0,489	1,177	11,01	0,260
ARG MTF	1810,23	3664,92	2,17	2,90	0,69	0,480	1,133	10,45	0,216
ARG MTF	1785,79	3647,18	2,74	2,49	0,62	0,435	1,078	10,28	0,232
ARG MTF	1785,66	3693,33	2,26	2,65	0,54	0,440	1,041	9,61	
ARG MTF	1802,63	3706,59	2,48	2,00	0,79	0,437	1,074	10,19	
ARG MMU	1856,49	4088,44	2,82	3,70	1,35	0,145	0,509	5,83	0,328
ARG MMU	1844,82	4039,32	2,87	4,66	1,28	0,283	0,811	8,44	0,340
ARG MMU	1859,23	4104,87	5,11	4,58	1,26	0,258	0,811	8,85	0,296
ARG MMU	1862,43	4190,73	4,95	4,72	1,23	0,243	0,738	7,92	0,248
ARG MMU	1854,62	4029,92	4,74	5,05	1,39	0,188	0,677	7,84	
ARG MMU	1848,44	4055,42	4,81	2,96	1,37	0,154	0,668	8,22	
ARG BAS	1845,63	3708,49	3,53	3,27	0,74	0,524	1,284	12,16	0,328
ARG BAS	1858,30	3722,88	2,99	2,25	0,35	0,613	1,468	13,68	0,324
ARG BAS	1857,66	3774,05	3,28	3,71	0,85	0,555	1,350	12,72	0,308
ARG BAS	1845,93	3722,72	3,40	3,74	0,75	0,584	1,406	13,16	0,320
ARG BAS	1843,07	3667,89	3,68	3,44	0,65	0,604	1,436	13,31	
ARG BAS	1814,45	3675,98	3,37	3,27	0,62	0,584	1,413	13,26	